

FRANCISCO ROGÉRIO RIBEIRO DA SILVA

**ATUALIZAÇÃO DE CONTORNOS EM CARTOGRAFIA  
NÁUTICA BASEADA EM IMAGENS DE VÍDEO E  
DADOS DO SENSOR HRV-PANCROMÁTICO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas, pelo Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - Área de Fotogrametria, do Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná.

Orientadores:

Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno

Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita

CURITIBA

2002

**“ATUALIZAÇÃO DE CONTORNOS EM CARTOGRAFIA  
NÁUTICA BASEADA EM IMAGENS DE VÍDEO E DADOS DO  
SENSOR HRV-PANCROMÁTICO”**

**POR**

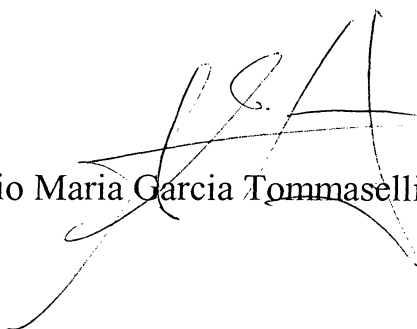
**FRANCISCO ROGÉRIO RIBEIRO DA SILVA**

Dissertação nº 162 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre  
no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade  
Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

Curitiba, 26 de agosto de 2002 .



Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno (UFPR) - Orientador e Presidente



Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli - Membro (UNESP)



Prof.ª Dr.ª Christel Lingnau - Membro (UFPR)

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

FRANCISCO ROGÉRIO RIBEIRO DA SILVA

### **ATUALIZAÇÃO DE CONTORNOS EM CARTOGRAFIA NÁUTICA BASEADA EM IMAGENS DE VÍDEO E DADOS DO SENSOR HRV-PANCROMÁTICO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas, pelo Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – Área de Fotogrametria, do Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná.

Orientadores:      Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno  
                             Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita  
                             Departamento de Geomática, UFPR

Examinadores:      Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>a</sup> Christel Lignau  
                             Departamento de Ciências Florestais, UFPR

                             Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli  
                             Departamento de Cartografia, UNESP

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelas oportunidades que se me foram oferecidas durante a vida, pelo bom senso de percebê-las e pela capacidade de poder aproveitá-las.

À minha família, pela formação e por todo o incondicional apoio, mesmo às custas de vários sacrifícios.

À Marinha do Brasil, nas pessoas de meus superiores, pares e subordinados, que sempre contribuíram para que me tornasse o cidadão que hoje sou, e também por todo o apoio logístico sem o qual não seria possível realizar este trabalho.

Aos meus orientadores, Dr. Centeno e Dr. Mitishita, por acreditarem em mim, tendo a paciência necessária para me ajudar a transformar uma idéia em realidade.

Aos meus professores, por tornarem o inalcançável em um simples degrau a ser escalado, e também por me ensinarem a crescer pelos meus méritos e esforços, respeitando aqueles à minha volta.

A todos os meus amigos, em especial a Andrea Tedesco, Edie, Eduardo, Elaine, Eliane, Luciano Farinha, Moisés e Regiane, por dedicarem parte de seu precioso tempo para me ajudar a vencer as dificuldades em vários sentidos e situações.



Sustentar o fogo que a vitória é nossa.  
O Brasil espera que cada um cumpra o seu dever.

Almirante Francisco Manuel Barroso da Silva

## SUMÁRIO

TERMO DE APROVAÇÃO .....	II
AGRADECIMENTOS .....	III
SUMÁRIO .....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	X
RESUMO.....	XI
ABSTRACT .....	XII
1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	1
1.2 – OBJETIVOS.....	4
1.3 – JUSTIFICATIVAS.....	5
2 – RÉVISÃO DA LITERATURA.....	7
2.1 – VIDEOGRAMETRIA.....	7
2.2 – CÂMARA DE VÍDEO.....	8
2.3 – SISTEMAS REFERENCIAIS DO ESPAÇO-IMAGEM .....	9
2.3.1 – Referencial de Tela.....	9
2.3.2 – Referencial “Fiducial” .....	10
2.3.3 – Referencial Fotogramétrico .....	12
2.4 – EQUAÇÕES DE COLINEARIDADE.....	13
2.5 – ERROS SISTEMÁTICOS DA IMAGEM.....	17
2.5.1 – Distorção Radial Simétrica.....	17
2.5.2 – Distorção Descentrada.....	19
2.5.3 – Refração Fotogramétrica .....	20
2.5.4 – Correção da Escala e Ortogonalidade dos Eixos.....	20
2.6 – AEROTRIANGULAÇÃO .....	21
2.7 – CALIBRAÇÃO .....	23
2.8 – GERAÇÃO DE ORTOFOTOS DIGITAIS .....	24
2.9 – ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA .....	24
2.9.1 – Algumas Técnicas de Atualização Cartográfica .....	26
2.9.1.1 – Atualização de Mapeamento Sistemático Usando Imagens Orbitais.....	26
2.9.1.2 – Detecção de Mudanças em Dados de Sensoriamento Remoto Usando Conjuntos Nebulosos.....	27
2.10 – ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA NÁUTICA .....	27
2.11 – SISTEMAS DE COR .....	29
2.11.1 – O Sistema RGB .....	30
2.11.2 – O Sistema IHS ( <i>Intensity, Hue and Saturation</i> ).....	30
2.11.3 – Análise de Componentes Principais – PCA .....	32

<b>3 – MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>35</b>
3.1 – CÂMARA DE VÍDEO.....	35
3.1.1 – Interpolação de Cores na Câmara JVC GR-DVF10U.....	37
3.2 – CALIBRAÇÃO DA CÂMARA DE VÍDEO .....	38
3.2.1 – Método das Câmaras Convergentes .....	40
3.2.1.1 – Ajustamento.....	41
3.3 – FILMAGEM, HELICÓPTERO E PLANEJAMENTO DE VÔO .....	44
3.3.1 – Afastamento entre as Faixas.....	45
3.3.2 – Imagens de Vídeo Digital.....	46
3.3.3 – Espalhamento e Correção Atmosférica .....	47
3.3.4 – Aerotriangulação .....	49
3.4 – INFORMAÇÕES DE ALTIMETRIA E MALHA REGULAR .....	51
3.5 – ORTOFOTOS.....	52
3.5.1 – Retificação de Imagens pelo Método Indireto .....	53
3.6 – MOSAICAGEM.....	56
3.7 – CORREÇÃO GEOMÉTRICA DA IMAGEM DO SATÉLITE SPOT .....	58
3.8 – FUSÃO DE IMAGENS .....	59
3.8.1 – Fusão de Imagens por Substituição de Banda.....	60
3.9 – DIGITALIZAÇÃO DE FEIÇÕES .....	61
<b>4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>63</b>
4.1 – CALIBRAÇÃO .....	63
4.1.1 – Deteminação de Coordenadas do Campo de Calibração .....	63
4.1.2 – Ajustamento.....	64
4.1.3 – Distorção Radial Simétrica.....	67
4.2 – AEROTRIANGULAÇÃO .....	73
4.3 – GERAÇÃO DE ORTOFOTOS.....	78
4.3.1 – Verificação da Acurácia Planimétrica.....	80
4.3.2 – Fusão do Ortomosaico com a Imagem SPOT .....	83
4.3.3 – Comparação entre as Imagens Produzidas e a Carta Náutica 2101 .....	86
<b>5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>90</b>
5.1 – CALIBRAÇÃO .....	90
5.2 – AEROTRIANGULAÇÃO .....	90
5.3 – ORTOFOTOS.....	91
5.4 – INTEGRAÇÃO DE DADOS .....	91
5.5 – METODOLOGIA.....	92
<b>6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>94</b>
<b>APÊNDICE 1 – PROGRAMA PARA CÁLCULO DAS COORDENADAS DO CAMPO DE CALIBRAÇÃO POR INTERSEÇÃO AVANTE .....</b>	<b>98</b>
<b>APÊNDICE 2 – PROGRAMA DE CALIBRAÇÃO DE UMA CÂMARA DE VÍDEO ATRAVÉS DE IMAGENS CAPTURADAS PARA UM COMPUTADOR .....</b>	<b>101</b>

<b>APÊNDICE 3 – PROGRAMA PARA AEROTRIANGULAÇÃO ATRAVÉS DE IMAGENS CAPTURADAS PARA UM COMPUTADOR.....</b>	<b>110</b>
<b>APÊNDICE 4 – PROGRAMA PARA GERAÇÃO DE ORTOIMAGENS A PARTIR DE IMAGENS CAPTURADAS PARA UM COMPUTADOR.....</b>	<b>118</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESQUEMA DO REFERENCIAL “FIDUCIAL”.....	11
FIGURA 2 – DISPOSIÇÃO DO REFERENCIAL FOTOGRAMÉTRICO NUMA AEROFOTO.....	12
FIGURA 3 – CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE.....	14
FIGURA 4 – DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA.....	18
FIGURA 5 – RECOBRIMENTO DAS IMAGENS.....	23
FIGURA 6 – DIAGRAMA DE FLUXO DOS ASPECTOS DE ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA.....	25
FIGURA 7 – CUBO RGB.....	30
FIGURA 8 – SISTEMAS RGB E IHS.....	31
FIGURA 9 – O SISTEMA IHS.....	32
FIGURA 10 – CÂMARA DE VÍDEO JVC GR-DVF10U.....	35
FIGURA 11 – OS SISTEMAS RGB E YCBCR JUNTOS.....	38
FIGURA 12 – O CAMPO DE CALIBRAÇÃO DA UFPR.....	39
FIGURA 13 – HISTOGRAMAS DE IMAGEM ESPALHADA E CORRIGIDA.....	48
FIGURA 14 – HISTOGRAMAS ANTES E DEPOIS DA CORREÇÃO ATMOS-FÉRICA.....	49
FIGURA 15 – INTERPOLAÇÃO BILINEAR.....	54
FIGURA 16 – DIAGRAMA DE FLUXO PARA OBTENÇÃO DE ORTOFOTOS.....	55
FIGURA 17 – TELA DE MOSAICAGEM DO PROGRAMA ENVI.....	57
FIGURA 18 – ESQUEMA DE ALVOS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO.....	63
FIGURA 19 – REPRESENTAÇÃO VETORIAL DAS DIFERENÇAS ENTRE COORDENADAS MEDIDAS E AJUSTADAS.....	67
FIGURA 20 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉ-TRICA.....	68
FIGURA 21 – REPRESENTAÇÃO VETORIAL DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉ-TRICA.....	69
FIGURA 22 – REPRESENTAÇÃO VETORIAL DA DISTORÇÃO DESCENTRADA.....	70
FIGURA 23 – REPRESENTAÇÃO VETORIAL DA RESULTANTE DAS DIS-TORÇÕES.....	71
FIGURA 24 – VARIAÇÕES NA CONDIÇÃO DE EPIPOLARIDADE.....	77
FIGURA 25 – IMAGEM SEM CORREÇÃO E ORTOIMAGEM.....	78
FIGURA 26 – ORTOMOSAICO OBTIDO.....	79
FIGURA 27 – REPRESENTAÇÃO VETORIAL DAS DIFERENÇAS PLANI-MÉTRICAS.....	82
FIGURA 28 – IMAGEM RESULTANTE DA FUSÃO ORTOMOSAICO/SPOT.....	84
FIGURA 29 – ORTOMOSAICO E IMAGEM FUNDIDA.....	85
FIGURA 30 – COMPARAÇÃO ENTRE O CONTOURO DA CARTA NÁUTICA E O ORTOMOSAICO.....	87
FIGURA 31 – COMPARAÇÃO ENTRE OS CONTORNOS DA CARTA NÁUTICA E DA ORTOIMAGEM.....	88

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COORDENADAS DO CAMPO DE CALIBRAÇÃO E PRECISÕES .....	64
TABELA 2 – COORDENADAS DO CAMPO DE CALIBRAÇÃO AJUSTADAS.....	65
TABELA 3 – DIFERENÇAS ENTRE COORDENADAS MEDIDAS/AJUSTADAS ...	66
TABELA 4 – PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DETERMINADOS .....	71
TABELA 5 – COORDENADAS AEROTRIANGULADAS.....	73
TABELA 6 – COORDENADAS AEROTRIANGULADAS.....	75
TABELA 7 – DIFERENÇAS ENTRE COORDENADAS DE TERRENO E AERO- TRIANGULADAS.....	76
TABELA 8 – COMPARAÇÃO ENTRE COORDENADAS DO TERRENO E DO ORTOMOSAICO.....	81

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- *ASCII* – *American Standard Code for Information Interexchange* – Código Americano Padrão para Intercâmbio de Informações.
- *CCD* – *Charge-Coupled Device* – Dispositivo de Carga Acoplada.
- *CHM* – Centro de Hidrografia da Marinha.
- *DHN* – Diretoria de Hidrografia e Navegação.
- *DV* – *Digital Video* – Vídeo Digital.
- *E, N* – *Easting, Northing*; respectivamente, coordenadas Leste e Norte do sistema UTM (*Universal Tranverse of Mercator* – Transversa Universal de Mercator).
- *GPS* – *Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global.
- *HRV* – *High Resolution Visible* – Visível de Alta Resolução.
- *HU-5* – 5º Esquadrão de Helicópteros de Emprego Geral.
- *IHS* – *Intensity, Hue and Saturation* – Intensidade, Matiz e Saturação.
- *MB* – Megabyte.
- *MDT* – Modelo Digital do Terreno.
- *MOS* – *Metal-Oxide Semiconductors* – Semicondutores de Óxido Metálico.
- *MVC* – Matriz Variância-Covariância.
- *MSL* – *Mean Sea Level* – Nível Médio dos Mares.
- *NTSC* – *National Television System Committee* – Comitê Nacional de Sistema Televisivo).
- *PCA* – *Principal Components Analysis* – Análise de Componentes Principais.
- *RGB* – *Red, Green, Blue* – Vermelho, Verde, Azul.
- *RADAR* – *Radio Detection And Ranging* – Detecção e Medição de Distância por Rádio.
- *RAM* – *Random Access Memory* – Memória de Acesso Aleatório.
- *RS* – Estado do Rio Grande do Sul.
- *RST* – *Rotation, Scale and Translation* – Rotação, Escala e Translação.
- *SIG* – Sistema de Informações Geográficas.
- *SPOT* – *Satellite Pour Observation de la Terre* – Satélite para Observação da Terra.
- *SSN-5* – Serviço de Sinalização Náutica do Sul.
- *TM* – *Thematic Mapper* – Mapeador Temático.
- *UFPR* – Universidade Federal do Paraná.
- *UH-12* – Helicóptero “Esquilo” (Aerospatiale) Monoturbinado.

## RESUMO

Este trabalho demonstra uma metodologia de atualização de contornos em cartografia náutica, baseada em imagens de vídeo, complementadas por imagens de satélite quando necessário. Foi utilizada uma câmara de vídeo digital comum, calibrada, acoplada a um helicóptero Esquilo UH-12, da Marinha do Brasil, para obtenção das imagens de vídeo do porto de Rio Grande (RS) que, depois de ortoretificadas, foram reunidas num ortomosaico. Gerou-se o contorno a partir do ortomosaico, complementado por uma imagem resultante da fusão dos dados do sensor HRV (*High Resolution Visible*) pancromático do satélite SPOT (*Satellite Pour Observation de la Terre*) com o próprio ortomosaico, e fez-se uma detecção visual das alterações ocorridas no terreno, a fim de avaliar a necessidade de atualização do contorno da carta náutica 2101, da Marinha do Brasil. O processo utilizado até o presente momento depende de aerolevantamentos feitos por empresas particulares, implicando na estrita observação de normas e leis que regulem a contratação de serviços por órgãos da administração pública direta. A metodologia ora apresentada tem por objetivo permitir à Marinha do Brasil atualizar os contornos de suas cartas náuticas por meios próprios, e, se adotada, reduziria custos e tempo de execução desta tarefa.



## **ABSTRACT**

This essay demonstrates a nautical cartography contour updating methodology, based in digital video imagery, complemented by satellite images, whenever needed. A common, calibrated digital video camera, connected to a Brazilian Navy Esquilo UH-12 helicopter, was used to obtain video images from the port of Rio Grande, state of Rio Grande do Sul. Those images, after being orthorectified, were gathered in a orthomosaic. A contour was generated based on the orthomosaic, complemented by an image resulting from merging SPOT-HRV panchromatic sensor data to the orthomosaic itself. Visual terrain changes detection has been conducted, in order to evaluate Brazilian Navy's nautical chart 2101 need for contour updating. The process used so far depends on aerial surveys carried out by private companies, which implies in the strict observation of rules and regulations for services contracting by direct, public administration institutions. The methodology here presented aims to allow the Brazilian Navy to update its nautical charts contours by its own and, should it be adopted, would reduce costs and this task accomplishment time.

## 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

O Brasil é um país cuja costa é uma das maiores do mundo, com uma extensão litorânea de cerca de 6.400km. Sendo a economia mais importante do cone sul do continente americano, tem mais de 95% de seu comércio exterior realizado por via marítima. Isso significa que a navegação é algo de extrema importância para sua balança comercial, sem falar em tudo o que dela decorre.

A navegação depende de um mapeamento náutico de qualidade. Com melhores e mais precisas cartas náuticas, o valor de um frete comercial cai, a capacidade de carga pode aumentar, as rotas comerciais se tornam mais seguras, e tudo isso contribui para gerar divisas, aumentar exportações, desenvolver o país. Eis o porquê de uma busca constante de aprimoramento dos meios de obtenção de dados para a produção da carta náutica, a custos menores, com igual ou melhor precisão.

No Brasil, as cartas náuticas são confeccionadas pela Marinha, mais precisamente pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Têm qualidade reconhecida internacionalmente estando entre as melhores e mais confiáveis do mundo. Mas o leito dos mares e águas interiores navegáveis é dinâmico, demandando uma constante atualização.

A DHN mantém suas cartas atualizadas através de levantamentos *in loco*, seguindo um planejamento minucioso. Toda carta editada pela DHN é feita segundo um levantamento batimétrico com o dobro de sua escala, ou seja, para uma carta com escala de 1:50.000, o levantamento é feito com escala 1:25.000. Isso permite uma maior riqueza e redundância de informações.

Desde o tempo das sondagens com varas e métodos totalmente dependentes da ação humana, até os trabalhos de hoje, longas décadas de aprimoramento de processos e equipamentos se passaram. As sondagens para as cartas são feitas atualmente com

equipamentos de última geração, sendo as fases de coleta e processamento de dados quase totalmente automatizadas.

A carta náutica apresenta porção de terra e é baseada em sondagens e levantamentos topográficos, suficientemente precisos à sua escala. Deve ser de fácil leitura ao usuário, apresentando linhas de costa, linhas isobatimétricas, profundidades mais freqüentes, toponímia, pontos notáveis para navegação, perigos à navegação, sinalização náutica e escala para leitura das coordenadas, entre os itens mais importantes. Mesmo assim, não pode jamais ser utilizada sem os chamados auxílios à navegação como, por exemplo, a Lista de Faróis e o Roteiro.

Cartas náuticas são um produto de precisão, demandando tempo e controle de qualidade para sua elaboração. A automação crescente, em conjunto com o avanço dos computadores e aplicativos, permite que grandes quantidades de dados sejam processadas de maneira rápida e eficaz, diminuindo ou até mesmo eliminando o erro humano. O uso das imagens digitais, facilmente manipuladas atualmente, contribui para tornar as cartas ainda mais precisas e atuais.

Sempre se faz mister atualizar as cartas náuticas, pois elas representam apenas um instante, enquanto o espaço representado continua a sofrer a ação do tempo, que o modifica incessantemente. A DHN é capaz de realizar levantamentos hidrográficos, a fim de manter atualizadas as profundidades das cartas náuticas, que são as informações mais relevantes para o navegante. Todavia, para atualizar contornos, a Marinha do Brasil depende de aerolevantamentos feitos por empresas especializadas, muitos dos quais estão desatualizados.

Entre as novas opções para coleta de dados encontram-se os sistemas orbitais de sensoriamento remoto, que podem coletar cenas de grandes porções de terra, a escalas consideradas boas para a navegação costeira, e as câmaras de vídeo. Estas últimas são capazes de coletar imagens digitais, pois são baseadas numa matriz de sensores fotoelétricos. Isso faz com que se tornem poderosos e baratos sensores aerofotogramétricos, pois podem facilmente ser acoplados a uma aeronave. Existe ainda a

opção de usar de forma conjunta os dados obtidos por diferentes sensores, como por exemplo através de técnicas de fusão de imagens. A obtenção da linha de costa seria, então, facilitada e conseguida de maneira rápida, permitindo, com o uso de pontos de apoio, uma rápida atualização.

Este trabalho procura mostrar uma metodologia que permita utilizar aeronaves de asa rotativa (helicópteros) e imagens de câmaras de vídeo digitais comuns — complementadas por imagens de satélite quando necessário — para atualizar contornos de cartas náuticas, eliminando a dependência de empresas especializadas em aerolevantamentos. Através do uso de recursos existentes na Marinha do Brasil, é possível atualizar o contorno de cartas náuticas visualmente, retirando tal informação de uma ortoimagem proveniente de imagens de vídeo capturadas para um computador pessoal, através da comparação com a carta náutica que se deseja atualizar.

Outro benefício deste trabalho é que, ao se eliminar a necessidade de contratar uma empresa para realizar um aerolevantamento, são eliminados também os entraves burocráticos, ou seja, tomadas de preço, concorrências e licitações, que podem fazer com que o produto gerado, além de não atender totalmente aos anseios do contratante, seja de produção demorada, fugindo ao propósito da rápida atualização. Ter-se-ia, então, uma metodologia que permitiria ao usuário (no caso, a Marinha do Brasil) gerar produtos de atualização de contorno e outras feições de cartas náuticas que atendessem a seus anseios, através de seus próprios meios independentemente, de maneira eficiente e eficaz, sem despendar recursos de grande monta.

## 1.2 – OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

- a) desenvolver uma metodologia de atualização de contornos da cartografia náutica baseada em imagens de vídeo e satélite integradas, com resolução e precisão suficientes para atualização cartográfica náutica;
- b) avaliar a viabilidade do uso de uma câmara de vídeo digital não-métrica convencional como alternativa para coletar dados para o mapeamento;
- c) avaliar a qualidade geométrica do mapa gerado com imagens de vídeo; e
- d) avaliar a viabilidade e a contribuição do uso integrado do ortomosaico com a imagem de satélite registrada.

Para tal, serão executadas as seguintes etapas:

- a) determinar as coordenadas do campo de calibração da Universidade Federal do Paraná, no Centro Politécnico;
- b) calibrar uma câmara de vídeo comum, para utilizá-la com fins videogramétricos;
- c) obter imagens aéreas utilizando uma câmara de vídeo comum calibrada;
- d) determinar os parâmetros geométricos das imagens capturadas da câmara de vídeo;
- e) gerar um ortomosaico através do processo indireto, usando um modelo digital do terreno (MDT);
- f) registrar a imagem de satélite, usando o ortomosaico como referência; e
- g) avaliar a contribuição do uso integrado.

### 1.3 – JUSTIFICATIVAS

O processo fotogramétrico analítico e digital, apesar de se basear em princípios fundamentais, está em constante evolução. A prova disso é a procura por métodos alternativos, que visam a otimizar o binômio custo-benefício.

A DHN tem como propósito garantir a segurança da navegação, e uma das tarefas a serem cumpridas para assegurá-la é manter suas cartas náuticas atualizadas. Como a informação mais importante ao navegante é a batimetria, levantamentos periódicos são feitos para que as informações batimétricas contidas nas cartas sejam fidedignas da realidade. No entanto, levantamentos batimétricos não atualizam contorno de cartas náuticas, e os dados utilizados para tal geralmente estão bastante desatualizados.

Contratar empresas para realizar aerolevantamentos nem sempre pode ser uma solução, pois com o atual quadro econômico do país e a obrigatoriedade de se cumprirem as normas relativas a gastos em instituições militares e do governo deixa a DHN, por vezes, sem alternativas. Daí a ânsia por métodos de produção de imagens ortoretificadas que possam ser usadas como base para atualizar contornos, usando os próprios meios navais e o pessoal da Marinha do Brasil.

Gerar ortomosaicos a partir de imagens de vídeo é um método rápido e barato, ainda mais se as imagens de vídeo puderem ser capturadas para um computador pessoal. Usando-se técnicas de aerotriangulação, mais especificamente o ajustamento em bloco, determinam-se os parâmetros geométricos de orientação das imagens de vídeo, e podem-se gerar ortofotos a partir delas. Com várias ortofotos em sequência de uma região, gera-se um ortomosaico.

Mas ortomosaicos gerados a partir de imagens de câmaras de vídeo comuns nem sempre apresentam a resolução espacial ou mesmo a resposta espectral desejada, em especial para a cartografia náutica, onde é importante mostrar ao usuário no produto final — a carta náutica — o contorno, ou seja, a linha de costa, definida pela fronteira terra-água. Para complementar as lacunas deixadas pela qualidade das imagens de vídeo,

seja na resolução espacial, seja na resolução espectral, pode-se usar imagens de satélite, com dados que suprem determinada falta de informação das imagens capturadas das câmaras de vídeo.

Fundir imagens significa unir dois conjuntos de dados de imagem, com características diferentes, e criar um terceiro, híbrido, que contenha as características de ambos. O cerne da questão de fusão de imagens é criar algo que seja de interesse do usuário final, ou que possa servir como subsídio para gerar novos dados e informações. No caso deste trabalho, considere-se a necessidade de obter uma linha de costa em locais onde houve sombras na imagem, ou seja, onde não houve resposta espectral suficiente para excitar os sensores. Como a imagem de satélite é apresentada sem sombras, ela serve como base para obter os dados não apresentados nas imagens de vídeo. Fundi-la tornaria o trabalho mais fácil, em virtude da imagem resultante apresentar a mesma porção terrestre e estar registrada em relação ao ortomosaico obtido. Usar somente imagens de satélite não seria uma solução factível no atual estado da arte, pois, mesmo com o aumento da resolução espacial, as imagens de satélite são pobres na sua geometria, que resultam em erros de mais de três pixels quando de seu georreferenciamento.

Este trabalho se justifica pelo uso de processos consagrados da Fotogrametria analítica e digital para viabilizar o uso de imagens digitais obtidas por uma câmara de vídeo comum — aerotransportada por um helicóptero — para obter dados métricos da superfície terrestre e aplicá-los à atualização cartográfica náutica. Uma imagem digital produzida por uma câmara de vídeo comum poderia, após um tratamento analítico, tornar-se importante ferramenta fotogramétrica, sendo complementada pela imagem do satélite SPOT.

## 2 – REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 – VIDEOGRAMETRIA

A Videogrametria difere da Fotogrametria apenas pelo equipamento de aquisição das imagens, ou seja, ao invés de se utilizar uma câmara fotogramétrica, usa-se uma câmara de vídeo, comum ou não. Pode-se, então, combinar as definições de Fotogrametria do Manual of Photogrammetry da American Society of Photogrammetry (1980) com uma definição apresentada por MAGRO (1995) e se enunciar a Videogrametria como: “Videogrametria é a arte, a ciência e a tecnologia de se obter informações confiáveis sobre objetos físicos e meio-ambiente através de processos de gravação, medição e interpretação de cenas de vídeo e padrões de energia eletromagnética radiante e outros fenômenos”.

A câmara de vídeo se torna um importante sensor, com as seguintes vantagens: baixo custo; disponibilidade em tempo real ou próxima de tempo real das imagens; potencial para processamento digital do sinal; e redundância de dados, pois as imagens são adquiridas a cada 1/30 segundo, produzindo múltiplas imagens de um alvo ou cena (MAUSEL et al, 1992).

O processo videogramétrico compreende as seguintes fases:

- a) videografar o objeto, utilizando um equipamento calibrado, de modo a poder restaurar a geometria projetiva;
- b) capturar as imagens de vídeo num computador pessoal, transformando-as para o meio digital;
- c) medir a geometria do objeto (no caso em coordenadas de linha e coluna) utilizando um programa de processamento de imagens digitais; e
- d) tornar as medidas próprias para utilização e visualização, ou seja, produzir mapas ou listas de coordenadas.



## 2.2 – CÂMARA DE VÍDEO

Uma câmara de vídeo é um sistema imageador, capaz de codificar a luz recebida através de um sistema de lentes num sistema de gravação, registrando cenas quadro a quadro que, quando exibidas em seqüência, dão uma ilusão de movimento. Com estas palavras, faz-se uma simplificação muito grande, pois esta idéia relativamente simples envolve em si diferentes ciências.

Numa maneira mais detalhada, um feixe luminoso incide sobre um sistema de lentes, sendo desviado e focalizado para uma matriz de elementos sensores, ou *Charge-Coupled Device* – Dispositivo de Carga Acoplada (CCD). O CCD é composto de elementos fotossensíveis (sensores) que podem ser tanto semicondutores de óxido metálico (MOS) ou fotodiodos. A energia luminosa que incide em cada elemento armazena uma carga proporcional à intensidade da luz. Estas cargas são coletadas em capacitores e depois transferidas da matriz para um amplificador cujo sinal de saída é uma série de voltagens. Estas voltagens, que são quantidades analógicas, necessitam ser convertidas para processamento digital, por meio de um conversor analógico-digital (EL-HAKIM, 1986). O conversor analógico-digital simplesmente transforma sinais de voltagem em valores digitais, armazenando seu resultado numa “memória de quadro” ou, como é mais conhecida, *frame buffer*.

O sinal armazenado no *frame buffer* não pode ser colocado numa posição qualquer. Vê-se então que a organização geométrica dos elementos sensores deve estar relacionada a um sistema referencial, de forma a permitir o correto posicionamento do sinal resultante do conversor analógico-digital. O sistema utilizado é uma matriz, pois é um arranjo bidimensional de dados, da mesma forma que uma imagem digital, com o primeiro sinal, correspondente ao nível de cinza do primeiro sensor, sendo colocado na origem, que é o campo superior esquerdo. Os demais são colocados da esquerda para a direita, completando as colunas. Quando todas as colunas de uma linha são preenchidas com valores digitais (níveis de cinza), inicia-se uma nova linha, na coluna mais à

esquerda. As cores são formadas pela adição dos níveis de cinza referentes aos sensores das cores primárias (vermelho, verde e azul).

A utilização de câmaras de vídeo para fins fotogramétricos tem, ainda, uma grande desvantagem: a baixa resolução espacial dos sensores no mercado; porém, tal fato logo deixará de ser um obstáculo, pois os equipamentos evoluem rapidamente, tornando-se melhores e de custo também acessível. Outras desvantagens são: a instabilidade do equipamento, em virtude da matriz de sensores ser dotada de um equipamento para compensar movimentos, permitindo que se mova durante as tomadas de imagens; e as cores são interpoladas, não refletindo inteiramente a realidade na imagem tomada. Tal fato, para o presente trabalho, não é relevante, uma vez que o objetivo é obter o contorno de uma porção de terra. As vantagens são, entre outras: a eliminação do processo de revelação, permitindo o acesso às imagens logo após a filmagem, ou mesmo em tempo real, caso se deseje conectar um monitor ou um equipamento de gravação, como um videocassete; e a eliminação do trabalho do filme, pois a luz incide diretamente sobre os sensores.

## 2.3 – SISTEMAS REFERENCIAIS DO ESPAÇO-IMAGEM

Os sistemas referenciais do espaço-imagem são fundamentais para o processo videogramétrico. Sem eles não seria possível restabelecer a geometria projetiva das imagens aéreas. Mas conhecer e utilizar os referenciais do espaço-imagem é apenas o começo. Saber transformar coordenadas entre eles é o mais importante, conforme se poderá ver.

### 2.3.1 – Referencial de Tela

O sistema referencial de tela  $(x,y)$  é bem semelhante ao sistema adotado pela matriz de sensores da câmara de vídeo, apenas com diferenças quanto à resolução

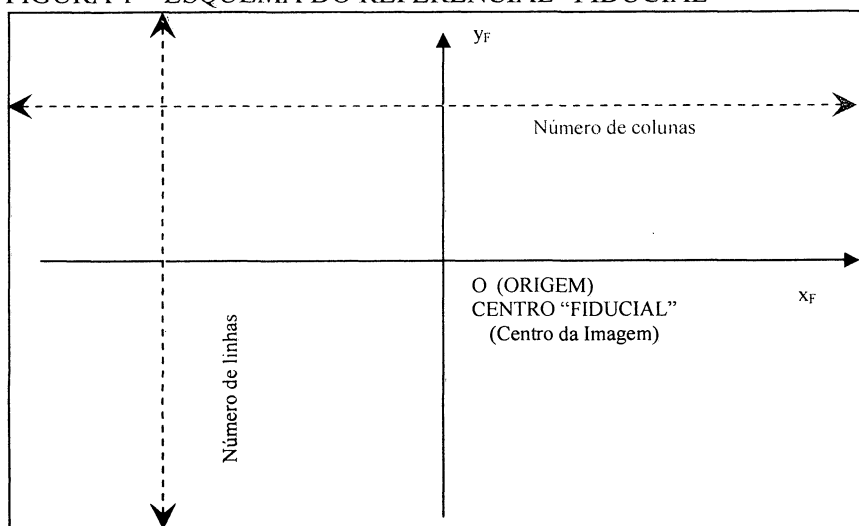
geométrica da imagem, pois a do referencial de tela está ligada à capacidade do dispositivo de captura de imagens. A coordenada  $x$  corresponde ao número da coluna, enquanto a coordenada  $y$  corresponde ao número da linha da imagem. É um sistema cuja origem encontra-se no canto superior esquerdo da imagem formada por *pixels* (*PICTure ELement* – elemento de imagem). Suas coordenadas possuem apenas valores inteiros e positivos; as coordenadas  $x$  aumentam da esquerda para a direita, enquanto as coordenadas  $y$  aumentam das linhas superiores para as linhas inferiores.

### 2.3.2 – Referencial “Fiducial”

Neste trabalho, coloca-se o referencial fiducial entre aspas porque ele não está de acordo com a própria etimologia da palavra, que quer dizer “de fé”, ou “confiável”; porém, por falta de uma definição melhor, ele será usado mesmo assim. O referencial “fiducial”  $(x_f, y_f)$  é um sistema cartesiano bidimensional, cuja origem, segundo ANDRADE (1998), situa-se na interseção de retas passantes em marcas fiduciais opostas. O eixo  $\overline{Ox_F}$  tem orientação positiva no sentido do vôo, enquanto o eixo  $\overline{Oy_F}$  é perpendicular ao primeiro, numa orientação positiva, tendo-se uma rotação anti-horária de  $90^\circ$  de  $\overline{Ox_F}$  para  $\overline{Oy_F}$  (sistema dextrógiro).

Muitas câmaras de vídeo possuem mecanismos para evitar que choques no corpo do equipamento atinjam a matriz de sensores, fazendo com que ela não seja fixa. Sendo assim, os quatro *pixels* dos cantos da matriz CCD não devem ser utilizados como marcas fiduciais, pois nada garante que os mesmos quatro pixels estarão na mesma posição na próxima tomada de imagem (GALO; HASEGAWA; TOMMASELLI, 2000).

FIGURA 1 – ESQUEMA DO REFERENCIAL “FIDUCIAL”



Quando os equipamentos possuem pixels de formato retangular, ao invés de quadrados, é necessário transformar as coordenadas do referencial de tela para o referencial “fiducial”, utilizando uma transformação como a mostrada nas equações (1)

$$\begin{aligned} x_f &= \left( x_m - \frac{ncol}{2} \right) \cdot \frac{dim_h}{ncol} \\ y_f &= \left( \frac{nlin}{2} - y_m \right) \cdot \frac{dim_v}{nlin} \end{aligned} \quad (1)$$

onde:

- a)  $x_f$  é a coordenada “fiducial” correspondente a  $x_m$ , coordenada em colunas (da matriz de sensores);
- b)  $y_f$  é a coordenada “fiducial” correspondente a  $y_m$ , coordenada em linhas (da matriz de sensores);
- c)  $ncol$  é o número de colunas da matriz de sensores;
- d)  $nlin$  é o número de linhas da matriz de sensores;
- e)  $dim_h$  é a dimensão horizontal (no caso, das colunas) em milímetros da matriz de sensores; e

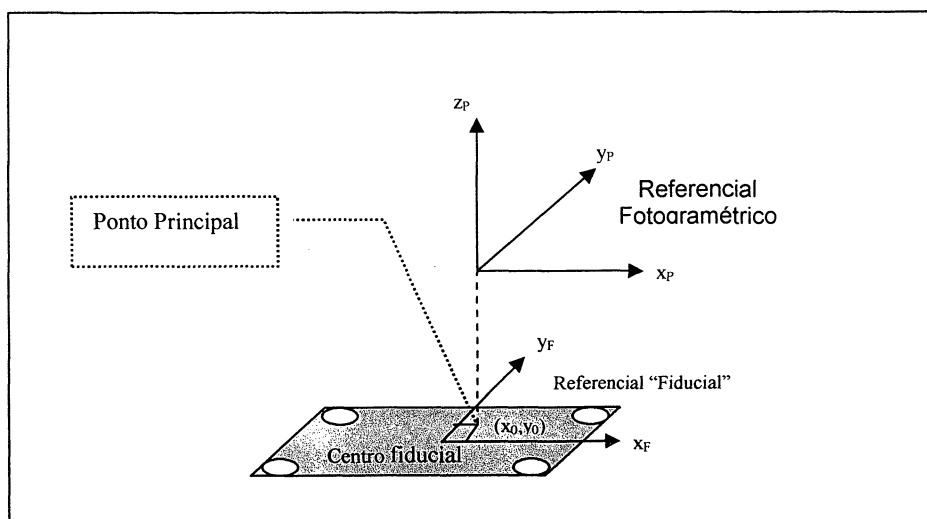
- f)  $dim_v$  é a dimensão vertical (no caso, das linhas) em milímetros da matriz de sensores.

Nem sempre é possível obter dos representantes autorizados ou mesmo do fabricante do equipamento o número de linhas e colunas da matriz de sensores. Pode-se, com maior facilidade, saber quais as dimensões da matriz de sensores de uma câmara de vídeo através do manual do fabricante; elas normalmente mantêm uma proporção de 4:3 (padrão internacional).

### 2.3.3 – Referencial Fotogramétrico

O referencial fotogramétrico é um referencial tridimensional, diferente dos referenciais de tela, da matriz de sensores e “fiducial”, tendo sua origem no ponto nodal anterior, para o caso de se trabalhar com o diapositivo, ou posterior, para o caso de se trabalhar com o negativo. O sistema é cartesiano tridimensional dextrógiro, e seus eixos  $\overline{Ox_p}$  e  $\overline{Oy_p}$  são paralelos aos eixos  $\overline{Ox_F}$  e  $\overline{Oy_F}$  do referencial “fiducial”. O eixo  $\overline{Oz_p}$  é perpendicular ao plano da foto, orientado para o ponto nodal anterior ou posterior, conforme se vê na figura 2.

FIGURA 2 – DISPOSIÇÃO DO REFERENCIAL FOTOGAMÉTRICO NUMA AEROFOTO



FONTE: ADAPTADO DE MITISHITA (1997).

Como uma boa simplificação, pode-se dizer que a diferença entre o referencial “fiducial” e o fotogramétrico é de apenas uma translação no plano da imagem, ou seja

$$\begin{aligned}x'_p &= x_f - x_0 \\ y'_p &= y_f - y_0\end{aligned}\tag{2}$$

O leitor já deve ter identificado que esta simplificação é algo confusa, uma vez que o referencial fiducial é bidimensional, enquanto o referencial fotogramétrico é tridimensional. Esta simplificação pode ser feita ao se admitir que a imagem é plana, o que fará com que todos os valores de  $z_p$  sejam iguais à distância focal. Os valores de  $x_0$  e  $y_0$ , coordenadas “fiduciais” do ponto principal, podem ser retirados de um certificado de calibração, quando se usam câmaras métricas calibradas. Quando se utilizam câmaras não métricas, como é o caso deste trabalho, é necessário determiná-los, bem como os valores dos parâmetros de distorções da imagem, que serão comentados depois. As coordenadas de um ponto no referencial fotogramétrico são seus valores no espaço-imagem ( $x'_p, y'_p, z'_p$ ). Normalmente, usam-se somente as coordenadas planas ( $x'_p, y'_p$ ) para as aplicações fotogramétricas.

Para fins de simplificação, admitiu-se neste trabalho que as coordenadas do ponto principal não variam.

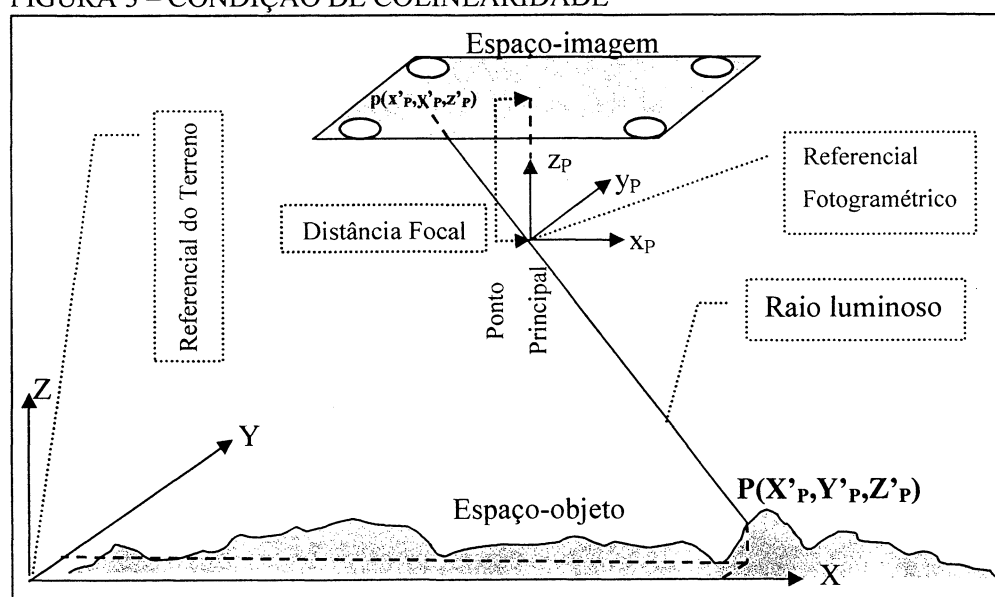
## 2.4 – EQUAÇÕES DE COLINEARIDADE

Não é intenção neste trabalho discursar sobre os vários referenciais no espaço-objeto, pois sua utilização se restringe a um referencial arbitrário comentado nos itens 2.7, 3.2 e 4.1.1, para calibração, e outro geodésico (UTM), para orientação exterior. Caso o leitor deseje se aprofundar neste assunto, sugere-se ver ANDRADE (1998) e LUGNANI (1987). Tendo então, visto os referenciais envolvidos no processo

fotogramétrico, à exceção do referencial do espaço-objeto, pode-se falar sobre a condição de colinearidade, modelo de amplo uso na Fotogrametria Analítica e Digital.

A condição de colinearidade baseia-se na propagação em linha reta de um raio ou feixe luminoso, desde o espaço-objeto até o espaço-imagem, passando pelo ponto principal. Essa condição, essencialmente teórica, é afetada pelas distorções introduzidas pelo equipamento usado para o registro da imagem e pela refração fotogramétrica. Admitindo que a condição teórica corresponda à realidade, verifica-se na figura 3 a condição de colinearidade.

FIGURA 3 – CONDIÇÃO DE COLINEARIDADE



FONTE: ADAPTADO DE MITISHITA (1997).

Vê-se então que  $x'_p$ ,  $y'_p$ , e  $z'_p$  são as coordenadas do ponto  $p$ , do espaço-imagem, no referencial fotogramétrico; e que  $X'_P$ ,  $Y'_P$  e  $Z'_P$  são as coordenadas do ponto  $P$ , seu correspondente do espaço-objeto, também no referencial fotogramétrico.

Daí se pode verificar que

$$\frac{x'_p}{X'_p} = \frac{y'_p}{Y'_p} = \frac{z'_p}{Z'_p} \Rightarrow \begin{cases} x'_p = z'_p \cdot \frac{X'_p}{Z'_p} \\ y'_p = z'_p \cdot \frac{Y'_p}{Z'_p} \end{cases} \quad (3)$$

Admitindo-se que os referenciais do espaço-objeto e fotogramétrico não são deformados, as diferenças entre eles seriam apenas de três rotações, três translações e um fator de escala. Pode-se então usar uma transformação isogonal para efetuar transformações entre eles. Matematicamente, estes parâmetros podem ser tratados com a transformação de similaridade no espaço.

$$\begin{bmatrix} X'_p \\ Y'_p \\ Z'_p \end{bmatrix} = \lambda \cdot M \cdot \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde:

- a)  $(X'_p, Y'_p, Z'_p)$  são as coordenadas do ponto no referencial fotogramétrico;
- b)  $\lambda$  é o fator de escala;
- c)  $(X, Y, Z)$  são as coordenadas do ponto (no espaço-objeto) no referencial fotogramétrico; e
- d)  $(X_0, Y_0, Z_0)$  são as coordenadas da estação de exposição no referencial do espaço-objeto.

$M$  é a matriz de rotação, ortogonal, ou seja,  $M^1 = M^T$ . A matriz  $M$  é dada por

$$M = R_z(\kappa) \cdot R_y(\varphi) \cdot R_x(\omega) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$



$$\begin{aligned}
 R_x(\kappa) &= \begin{bmatrix} \cos(\kappa) & \sin(\kappa) & 0 \\ -\sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 R_y(\varphi) &= \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 & \sin(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \\
 R_z(\omega) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & \sin(\omega) \\ 0 & -\sin(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{6}$$

onde  $\kappa$ ,  $\varphi$ , e  $\omega$  são os ângulos eulerianos que representam as rotações necessárias para tornar os referenciais paralelos (MITISHITA, 1997).

Pode-se explicitar o produto das três matrizes de rotação que dão origem à matriz  $M$ , ficando, então

$$\begin{cases}
 m_{11} = \cos(\varphi) \cdot \cos(\kappa) \\
 m_{12} = \cos(\omega) \cdot \sin(\kappa) + \sin(\omega) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\kappa) \\
 m_{13} = \sin(\omega) \cdot \sin(\kappa) - \cos(\omega) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\kappa) \\
 m_{21} = -\cos(\varphi) \cdot \cos(\kappa) \\
 m_{22} = \cos(\omega) \cdot \sin(\kappa) - \sin(\omega) \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\kappa) \\
 m_{23} = \sin(\omega) \cdot \cos(\kappa) + \cos(\omega) \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\kappa) \\
 m_{31} = \sin(\varphi) \\
 m_{32} = -\sin(\omega) \cdot \cos(\varphi) \\
 m_{33} = \cos(\omega) \cdot \cos(\varphi)
 \end{cases}$$

Finalmente, as equações de colinearidade, modelo fundamental de quase todas as aplicações da Fotogrametria Analítica e Digital, podem ser escritas da forma conhecida, em que relacionam os referenciais fotogramétrico e geodésico.

$$\begin{aligned}
 x &= -c \frac{m_{11} \cdot (X - X_0) + m_{12} \cdot (Y - Y_0) + m_{13} \cdot (Z - Z_0)}{m_{31} \cdot (X - X_0) + m_{32} \cdot (Y - Y_0) + m_{33} \cdot (Z - Z_0)} \\
 y &= -c \frac{m_{21} \cdot (X - X_0) + m_{22} \cdot (Y - Y_0) + m_{23} \cdot (Z - Z_0)}{m_{31} \cdot (X - X_0) + m_{32} \cdot (Y - Y_0) + m_{33} \cdot (Z - Z_0)}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Fazendo-se

$$\begin{aligned}
 \Delta X &= m_{11} \cdot (X - X_0) + m_{12} \cdot (Y - Y_0) + m_{13} \cdot (Z - Z_0) \\
 \Delta Y &= m_{21} \cdot (X - X_0) + m_{22} \cdot (Y - Y_0) + m_{23} \cdot (Z - Z_0) \\
 \Delta Z &= m_{31} \cdot (X - X_0) + m_{32} \cdot (Y - Y_0) + m_{33} \cdot (Z - Z_0)
 \end{aligned} \tag{10}$$

e combinando (9) com (10), obtém-se a forma reduzida

$$\begin{aligned}
 x &= -c \frac{\Delta X}{\Delta Z} \\
 y &= -c \frac{\Delta Y}{\Delta Z}
 \end{aligned} \tag{11}$$

## 2.5 – ERROS SISTEMÁTICOS DA IMAGEM

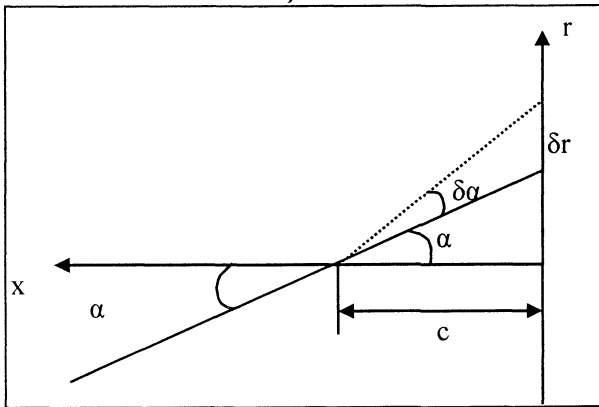
Como dito no subitem 2.4, a condição de colinearidade entre o ponto no espaço-objeto, o ponto principal e o ponto no espaço-imagem é puramente teórica, pois a formação da imagem tem em si erros sistemáticos, causados pelas imperfeições do equipamento sensor e também pela refração fotogramétrica.

### 2.5.1 – Distorção Radial Simétrica

A distorção radial simétrica origina-se da impossibilidade das lentes serem fabricadas numa forma ideal, ou seja, um parabolóide de revolução; o que normalmente ocorre é que elas tendam a ser circulares. Por causa disso, forma-se uma distorção, que aumenta quanto mais se afasta do centro.

Conrady, em 1919 (ANDRADE, 1998, p.91), formulou um modelo matemático para a distorção radial simétrica, dizendo que ela seria uma parcela indesejável da refração sofrida por um raio de luz, ao atravessar uma lente. Na figura 4, vê-se que um raio de luz que antes de penetrar na câmara forme um ângulo  $\alpha$  com o eixo óptico, ao atravessar o sistema de lentes fará um ângulo  $\alpha + \delta\alpha$ , causando um deslocamento  $\delta r$  na posição da imagem.

FIGURA 4 – DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA



FONTE: ADAPTADO DE ANDRADE (1998).

As equações para corrigir a distorção radial simétrica em fotocoordenadas são as seguintes

$$\begin{aligned} x' &= x'_p - \delta r_x \\ y' &= y'_p - \delta r_y \end{aligned} \quad (12)$$

onde

$$\begin{aligned} \delta r_x &= (K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4 + K_3 \cdot r^6) \cdot x'_p \\ \delta r_y &= (K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4 + K_3 \cdot r^6) \cdot y'_p \\ r &= \sqrt{x'^2_p + y'^2_p} \end{aligned} \quad (13)$$

### 2.5.2 – Distorção Descentrada

A distorção descentrada é causada pela impossibilidade dos eixos ópticos do conjunto de lentes (que compõe uma objetiva) estarem perfeitamente alinhados. Ela é composta pelas distorções tangencial e radial assimétrica, conforme demonstrou Conrady em 1919 (ANDRADE, 1998, p.97).

As equações para cálculo da distorção descentrada em fotocoordenadas foram desenvolvidas em alguns trabalhos publicados por BROWN (1964, 1965). Contudo, eram longas e os valores a serem nelas aplicados de difícil obtenção, até que o mesmo BROWN (1966) agrupou seus parâmetros, resultando nas equações (14).

$$\begin{aligned}\delta d_x &= P_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot x'^2) + 2 \cdot P_2 \cdot x' \cdot y' \\ \delta d_y &= 2 \cdot P_1 \cdot x' \cdot y' + P_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot y'^2)\end{aligned}\tag{14}$$

Para efeito de calibração de uma câmara terrestre, apenas a determinação dos parâmetros da distorção radial simétrica e da distorção descentrada é suficiente, uma vez que, para parametrizar a distorção causada pela refração fotogramétrica, em especial a que é causada pelo próprio deslocamento da aeronave, deve-se realizar um voo com o equipamento. Deve-se ter em mente que o parâmetro  $K_1$ , da distorção radial simétrica, é correlacionado com a refração fotogramétrica; portanto, caso se deseje parametrizar a distorção causada pela refração, deve-se primeiro corrigir as distorções radial simétrica e descentrada da imagem, para depois aplicar as coordenadas ao ajustamento, ou permitir que  $K_1$  absorva os erros. Assim, eliminando os erros sistemáticos das equações (14) de (12), tem-se

$$\begin{aligned}x'' &= x' - \delta d_x \\ y'' &= y' - \delta d_y\end{aligned}\tag{15}$$

ou, explicitando mais ainda, usando as equações (4), (12) e (14)

$$\begin{aligned}x'' &= x_f - x_0 - \delta r_x - \delta d_x \\y'' &= y_f - y_0 - \delta r_y - \delta d_y\end{aligned}\tag{16}$$

### 2.5.3 – Refração Fotogramétrica

A refração fotogramétrica é causada pelas diferenças de densidade ao longo da camada atmosférica atravessada pelo raio luminoso, desde o ponto no espaço-objeto até a estação de exposição. Estas diferenças de densidade são causadas por mudanças de temperatura, umidade e pressão. Algumas expressões existem para o cálculo da refração fotogramétrica, e NOVAC (1991) diz que o desvio angular do raio luminoso é dado por

$$\Delta\tau = K \cdot \frac{r}{c} = K \cdot \tan(\tau)\tag{17}$$

onde:

- a)  $K$  é o índice de refração;
- b)  $r$  é a distância radial;
- c)  $\tau$  é o ângulo entre o raio luminoso e o eixo focal da imagem.

Para a chamada “atmosfera padrão”, o valor de  $K$  pode ser calculado com a seguinte fórmula:

$$K = 0,00241 \cdot \left[ \frac{Z_0}{Z_0^2 - 6 \cdot Z_0 + 250} - \frac{Z_p}{Z_0 \cdot (Z_p^2 - 6 \cdot Z_p + 250)} \right]\tag{18}$$

onde:

- a)  $Z_0$  é a altitude do ponto principal acima do nível do mar (em quilômetros); e
- b)  $Z_p$  é a altitude do ponto terrestre acima do nível do mar (em quilômetros).

### 2.5.4 – Correção da Escala e Ortogonalidade dos Eixos

No caso de uma câmara de vídeo baseada num CCD, seu fabricante, com todos os cuidados que tenha tomado para manufaturar seu equipamento, não pode garantir que não existem erros de escala (pixels maiores que outros), ou mesmo erros de ortogonalidade

(pixels que não estejam alinhados com outros dentro da matriz de sensores, ou mesmo eixos da matriz de sensores não ortogonais). Nos sensores das câmaras mais recentes, os pixels têm forma retangular, e não quadrada, o que já pode causar alguns erros quanto ao centro do pixel. MONIWA (1977) apresentou um modelo para corrigir estes erros, e suas distorções podem ser modeladas pelas equações apresentadas em (19).

$$\begin{aligned}\delta e_x &= A \cdot (x_f - x_0) \\ \delta e_y &= B \cdot (x_f - x_0)\end{aligned}\tag{19}$$

Verifica-se nas equações (19) que o valor das coordenadas fotogramétricas  $(x_f - x_0)$  para calcular as distorções em  $x$  e  $y$  é o mesmo. Isso significa apenas que um dos eixos é considerado como referência. Assim, as coordenadas corrigidas de todos os erros — exceto o erro causado pela refração fotogramétrica — serão escritas como

$$\begin{aligned}x_c &= x_f - x_0 - \delta r_x - \delta d_x - \delta e_x \\ y_c &= y_f - y_0 - \delta r_y - \delta d_y - \delta e_y\end{aligned}\tag{20}$$

## 2.6 – AEROTRIANGULAÇÃO

Pode-se definir a aerotriangulação como uma técnica fotogramétrica para a determinação de coordenadas num referencial específico (ANDRADE, 1998). A partir da definição de Aerotriangulação dada por FERNANDES (1984), pode-se enunciá-la como sendo um conjunto de operações de Fotogrametria que permite determinar as coordenadas de pontos do terreno imageados em fotografias aéreas, a partir de um reduzido número de pontos de apoio, cujas coordenadas no terreno são fotoidentificáveis. Mais especificamente, ou seja, para o caso deste trabalho, define-se a Aerotriangulação como sendo a densificação de Pontos de Controle utilizados na correlação entre a imagem das

fotos aéreas e o Sistema de Coordenadas do mapeamento, partindo de poucos pontos de coordenadas conhecidas nos dois Sistemas (imagem e terreno) (ESTEIO, 1999). A aerotriangulação pode ser analógica, semi-analítica, analítica e digital. No âmbito deste trabalho, apenas se discorrerá sobre a aerotriangulação analítica.

A Aerotriangulação analítica teve seu grande impulso com o advento e facilidade de acesso a computadores que tornaram possível modelar e calcular matematicamente as relações geométricas entre fotos adjacentes, bem como erros sistemáticos, reduzindo o uso de equipamentos analógicos e semi-analíticos e aumentando o rigor dos ajustamentos executados.

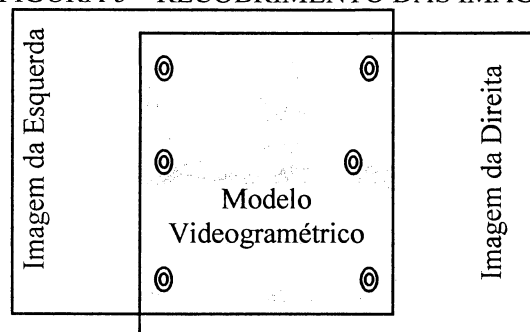
O leitor deve notar o uso da palavra “imagem” ao invés de “aerograma”, “foto”, “aerofoto” ou “plano do negativo”. A intenção é justamente mostrar o uso das técnicas fotogramétricas num processo videogramétrico com câmara de vídeo digital, onde não existem marcas fiduciais, negativos, nem diapositivos.

Usou-se neste trabalho o ajustamento de bloco (*bundle block adjustment*), restrito a uma faixa de seis imagens, a fim de determinar os parâmetros de orientação exterior ( $\kappa, \varphi, \omega, X_0, Y_0, Z_0$ ) para cada imagem e as coordenadas tridimensionais ( $X_i, Y_i, Z_i$ , onde  $i$  é o número do ponto) de cada ponto no espaço-objeto MITISHITA (1997). Determinar os parâmetros de orientação exterior de cada foto é o que permite depois, de posse de um modelo numérico do terreno, gerar ortoimagens.

O modelo a ser utilizado emprega as equações de colinearidade, comentadas no subitem 2.4. No presente trabalho, optou-se por executar a aerotriangulação de uma faixa de seis imagens, a fim de homogeneizar resultados.

Observa-se na figura 5 que é necessário que as duas imagens tenham um recobrimento de cerca de 60%, pois isso garantirá que uma terceira imagem, com os mesmos 60% de superposição à anterior, também cubra parcialmente o par original.

FIGURA 5 – RECOBRIMENTO DAS IMAGENS



FONTE: ADAPTADO DE MITISHITA (1997)

## 2.7 – CALIBRAÇÃO

Para alcançar a condição de colinearidade, os erros sistemáticos da imagem devem ser corrigidos, e só a partir daí é factível calcular parâmetros de orientação exterior, orientar faixas e modelos, aplicando as equações de colinearidade na resolução. O processo de calibração da câmara consiste em determinar as coordenadas das marcas fiduciais, do ponto principal no sistema fiducial, e dos parâmetros de correção às distorções radial simétrica e descentrada. A calibração é um caso particular da fototriangulação, pois se busca não somente determinar os parâmetros de orientação exterior das imagens, mas também os parâmetros de calibração do equipamento imageador.

No presente trabalho foi utilizado o Método das Câmaras Convergentes para calibrar o equipamento, e apenas sobre ele se discorrerá. Para mais métodos e modelos de calibração, ver JAIN, KASTURI e SCHUNCK (1995), ANDRADE e OLIVAS (1981), e GALO (1993).



## 2.8 – GERAÇÃO DE ORTOFOTOS DIGITAIS

Segundo ANDRADE (1998), retificar uma imagem consiste em projetá-la, segundo seu próprio feixe perspectivo, num plano horizontal. Seus ângulos  $\varphi$  e  $\omega$  tornam-se nulos, sendo os deslocamentos estimados e compensados para todos os elementos de área de uma imagem. A imagem assim corrigida é uma ortofoto, ou seja, uma imagem em projeção cartográfica (LUGNANI, 1987; ANDRADE, 1998), e está pronta a ser utilizada numa atualização.

A projeção ortogonal é uma transformação de referenciais, na qual o paralelismo e a forma de objetos pertencentes a dois espaços — o espaço-imagem e o espaço-objeto — são invariantes (LUGNANI, 1987). Estando a ortofoto correta e absolutamente orientada, estarão a linha de costa, as feições e todos os objetos nela imageados posicionados de maneira correspondente à realidade.

## 2.9 – ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA

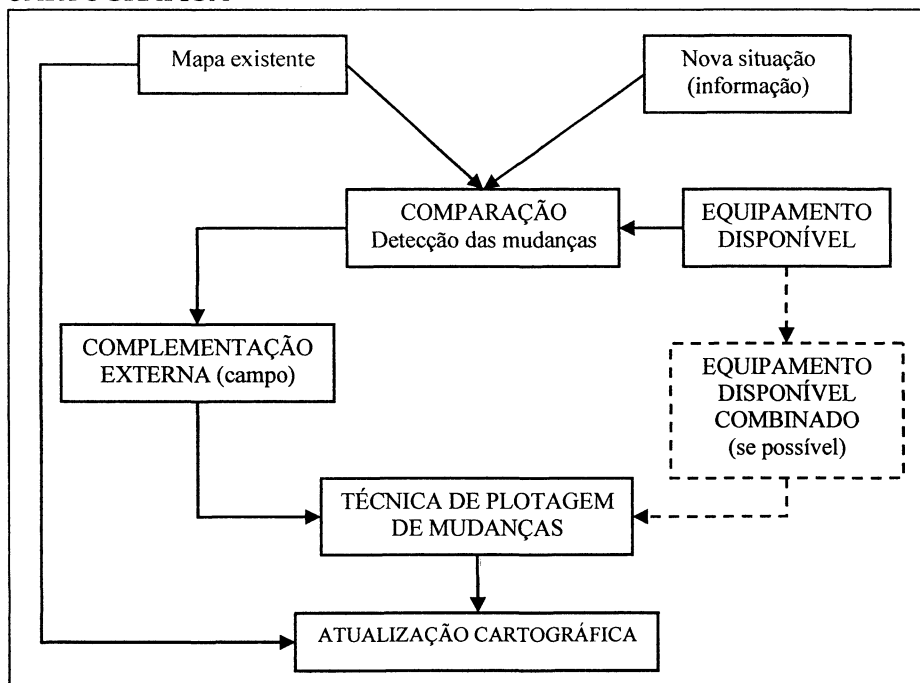
Toda representação gráfica da superfície terrestre pode ser considerada como a imagem de um instante. Como o planeta tem uma característica dinâmica, mesmo que a longo prazo, em algum período após a sua produção estará a carta náutica desatualizada, seja em relação à batimetria, seja em relação ao contorno que ela apresenta (quer dizer, à fronteira terra-água), seja em relação à topografia. Muitos pontos notáveis em terra são utilizados como referência para os navegantes, principalmente quando navegando em águas restritas ou costeiras.

O processo de desatualização é contínuo, e duas operações principais devem ser executadas para que novos elementos sejam adicionados aos mapas:

- a) detecção de mudanças ocorridas no espaço-objeto; e
- b) atualização da carta.

A figura 6 mostra um diagrama de fluxo da atualização cartográfica.

FIGURA 6 – DIAGRAMA DE FLUXO DOS ASPECTOS DE ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA



FONTE: Van ZUYLEN (1976)

Van ZUYLEN (1976) também cita três tipos de atualização cartográfica:

- a) atualização rápida – ação de atualizar apenas os elementos mais importantes do mapa;
- b) atualização parcial – ação de atualizar algumas partes selecionadas do mapa; e
- c) atualização completa – ação de atualizar todos os elementos que sofreram mudanças.

Além disso, prossegue dizendo que o intervalo de atualização cartográfica é um elemento a ser considerado, e também cita três sistemas:

- a) atualização contínua – toda mudança é aplicada ao mapa original, a fim de mantê-lo atualizado;
- b) atualização cíclica – a atualização é feita em intervalos de tempo pré-determinados; e

- c) atualização seletiva – a atualização está relacionada a uma ordem de prioridade, que é determinada pela demanda ou taxa de mudança, e não por um período fixo.

### 2.9.1 – Algumas Técnicas de Atualização Cartográfica

Neste subitem não se tenciona discutir técnicas de atualização cartográfica, mas apenas apresentá-las de forma breve, a fim de que o leitor possa ter idéia do estado da arte.

#### 2.9.1.1 – Atualização de Mapeamento Sistemático Usando Imagens Orbitais

É viável utilizar imagens dos sensores TM-LANDSAT e pancromático *High Resolution Visible* — Alta Resolução na Faixa Visível do Espectro Eletromagnético — (HRV) do satélite SPOT como alternativas para atualização planimétrica de cartas com escalas 1:250.000 e 1:100.000, com pequenas restrições devidas à resolução espacial das imagens (d'ALGE e FERREIRA, 1988).

FIANI e VATORE (2000) usaram imagens do sensor HRV-pancromático para mapear deslizamentos de terra. As imagens foram corrigidas de suas distorções devidas à altitude e atitude da plataforma orbital, *Instantaneous Field Of View* – Campo Instantâneo de Visada (IFOV), e curvatura terrestre. Além disso, As imagens foram georreferenciadas, orientadas exteriormente, ortoretificadas, e dela foram extraídas feições geográficas para cartografia. Realizou-se ainda a extração automática de um Modelo Digital do Terreno, através do uso de pares estereoscópicos, usando-se a condição de epipolaridade de pares estereoscópicos.

### 2.9.1.2 – Detecção de Mudanças em Dados de Sensoriamento Remoto Usando Conjuntos Nebulosos

O conceito de conjuntos nebulosos (*fuzzy sets*) foi definido por ZADEH (1965) como sendo uma classe com uma continuidade de níveis que dela fazem parte. BURROUGH (1989) diz ser apropriado usarem-se conjuntos nebulosos quando se depara com ambigüidade, vagueza e ambivalência em conceitos matemáticos ou conceituais. A lógica nebulosa pode ser usada com sucesso em classificação de áreas que apresentem gradações de uma mesma classe, como por exemplo tipos diferentes de vegetação ou concentração urbana de densidades variadas.

METTERNICHT (1999) usou conjuntos nebulosos para detectar mudanças em imagens aéreas e de sensoriamento remoto, e propôs um sistema capaz de priorizar as necessidades de mapeamento de uma região, sendo a acurácia de seu método dependente da resolução espacial das imagens utilizadas, condicionado a detecção de feições pontuais, lineares e de superfície. Com isso, foi capaz de definir fronteiras e delimitar áreas em que ocorreram ou não mudanças significativas, contribuindo para o processo decisório da atualização cartográfica de sua região de estudo.

## 2.10 – ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA NÁUTICA

Conforme exposto no subitem 1.1, a Marinha do Brasil, através da DHN, realiza levantamentos batimétricos periódicos *in loco*, a fim de manter atualizada a informação batimétrica de suas cartas náuticas. Com isso, são gerados pequenos adendos — conhecidos comumente como “bacalhaus” — que devem ser recortados e colados sobre a carta náutica. Os bacalhaus são parte integrante de uma publicação quinzenal denominada “Aviso aos Navegantes”, que contém várias informações, entre elas, atualizações à carta náutica. No “Aviso aos Navegantes” também existem outras informações que podem ser manualmente plotadas na carta náutica, como áreas de exercício e interdição, novos sinais

náuticos, condição da sinalização e até mesmo a presença de altos-fundos, que são perigos à navegação.

Os contornos que são apresentados na carta náutica nem sempre retratam a realidade, posto que são baseados em levantamentos aerofotogramétricos antigos (alguns têm cerca de vinte anos). Contudo, a informação mais importante apresentada na carta náutica e crucial para a segurança da navegação é, sem dúvida, a batimetria, que se mantém atualizada. A Marinha do Brasil recentemente começou a estudar a viabilidade de atualização de contornos usando imagens do sensor HRV-pancromático.

O processo de atualização de contornos nas cartas náuticas ainda é feito por comparação visual, ou seja, um operador identifica visualmente as alterações relevantes que devem ser lançadas numa próxima edição. As alterações, no entanto, já são feitas por editoração eletrônica. Sendo assim, o operador somente edita o trecho da carta náutica a ser alterado. Este sistema se mostrou bastante eficaz para lançamento de novas marcas de sinalização náutica, como por exemplo bóias, faroletes e faróis. Não foram feitas alterações significativas em contornos, digitalizados a partir de cartas náuticas impressas.

Com este trabalho, pretende-se ampliar o uso de imagens digitais aéreas na DHN, produzidas por meios próprios, a fim de que se possam ter informações confiáveis e atuais, em mídia que tenha flexibilidade de editoração e rapidez de atualização. As alterações continuariam a ser feitas através de comparação visual num primeiro estágio, e depois poder-se-ia utilizar outros métodos, como a comparação de pares estereoscópicos híbridos por cintilamento (AMORIM; SILVA; TOMMASELLI, 2001). Atualizar contornos seria uma tarefa mais fácil e rápida do que é hoje, pois as imagens ortoretificadas já estariam disponíveis em meio digital, e poderiam inclusive ser transmitidas num canal de radiodados, para auxiliar o navegante que acessasse águas costeiras e restritas.

Ao se pensar em métodos de navegação em águas costeiras e restritas, não se pode deixar de falar na navegação RADAR (*Radio Detection And Ranging* – Detecção e Medição de Distância por Rádio). A navegação RADAR em sua forma mais precisa é

feita com a medida de três distâncias a pontos de terra notáveis, presentes na tela do equipamento e na carta náutica. Como um exemplo hipotético, suponha-se a construção de um píer a partir da linha de costa, avançando sobre o mar e constituindo-se num excelente ponto notável para a navegação RADAR. Porém o navegante não poderia lançar na carta náutica a distância dele medida, se aquela não o apresentar. Eis o porquê de um levantamento videogramétrico, capaz de atualizar contornos da carta náutica de maneira eficiente e eficaz, usando ortofotos digitais geradas a partir de imagens de vídeo, com custo relativamente mais baixo que o procedimento convencional.

## 2.11 – SISTEMAS DE COR

JAIN, KASTURI e SCHUNCK (1995) descrevem os três fatores dos quais depende a percepção de cores:

- a) a reflectância espectral das superfícies da cena, que determina como estas superfícies refletem a cor;
- b) o conteúdo espectral da iluminação do ambiente, que o conteúdo de cor da luz que brilha a partir das superfícies; e
- c) a resposta espectral dos sensores do sistema de imageamento.

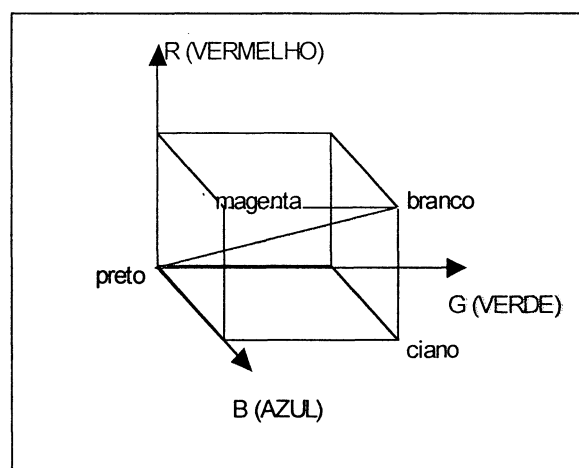
Segundo GONZALEZ e WOODS (1992), sistemas de cores têm como propósito facilitar a especificação das cores em alguma forma padrão e de aceite geral. Um modelo de cor é uma especificação de um sistema de coordenadas tridimensionais e um subespaço dentro desse sistema onde cada cor é representada por um único ponto.

Existem vários sistemas de cor que podem ser utilizados para o processo de fusão no domínio da imagem. Neste trabalho procurou-se mostrar os sistemas *RGB*, *IHS*, e também *PCA*, que não é um sistema de cor, mas pode ser utilizado na fusão.

### 2.11.1 – O Sistema RGB

O sistema RGB é baseado em três cores primárias cuja combinação aditiva possibilita formar todas as outras. O sistema RGB é um subespaço definido como um cubo de cores (ou bandas, no caso de uma imagem multiespectral). Preto está na origem e branco está no canto diametralmente oposto, e a diagonal que os liga está em tons de cinza; os valores das cores primárias estão nos três cantos (de valores máximos) dos eixos, e ciano, magenta e amarelo estão nos outros três cantos (GONZALEZ; WOODS, 1992). Na figura 7 visualiza-se o cubo de cores RGB, podendo ser vistos inclusive os resultados de somas de pares de cores.

FIGURA 7 – CUBO RGB

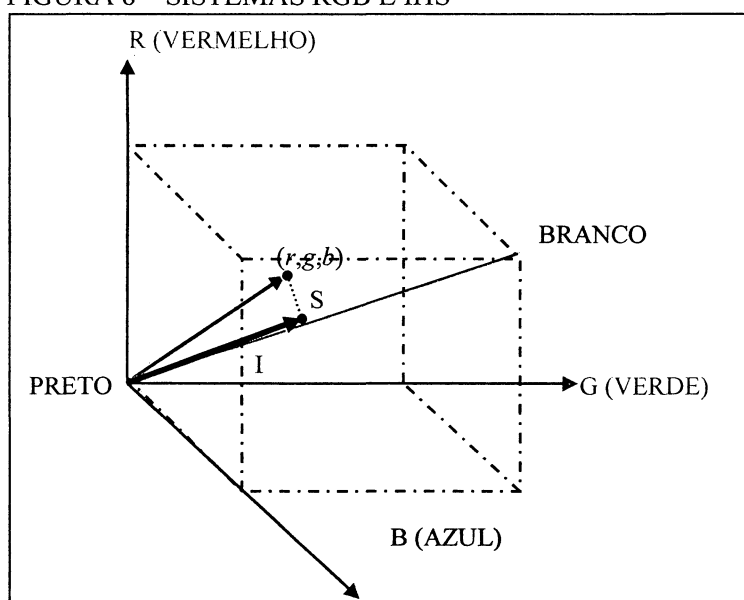


### 2.11.2 – O Sistema IHS (*Intensity, Hue and Saturation*)

O sistema IHS é conhecido por ser um dos sistemas que mais se assemelham à percepção humana de cores, em especial pelas componentes matiz e saturação. O matiz (*Hue*, em inglês) é o aspecto colorido da impressão visual, que normalmente corresponde ao estímulo da retina pela luz de comprimentos de onda de uma pequena faixa do espectro. Já a saturação (*S*) significa o conteúdo relativo de branco de um estímulo percebido como sendo de um determinado matiz. A intensidade (*I*) é o atributo que permite a uma imagem ser classificada de escura a clara (DENT, 1985).

Para facilitar o entendimento dos conceitos supra, podem-se representar as componentes do sistema *IHS* dentro do espaço delimitado pelo sistema *RGB*, como é mostrado na figura 8. Uma cor, descrita pela combinação das três cores primárias, pode ser descrita como um vetor de posição correspondente  $(r,g,b)$ , dentro do cubo definido pelo sistema *RGB*. A intensidade é a projeção deste vetor sobre a diagonal principal.

FIGURA 8 – SISTEMAS RGB E IHS

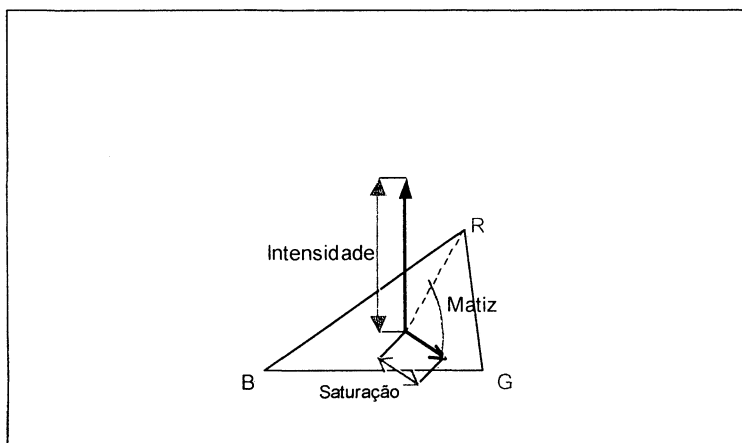


Na figura 9, o sistema *IHS* é representado por um eixo vertical que corresponde à intensidade (linha diagonal principal do sistema *RGB*) e o plano perpendicular a este eixo, onde são medidos a saturação e o matiz. A saturação é determinada pela distância entre o ponto e a diagonal principal (SCHOWENGERT, 1983). Segundo GONZALEZ e WOODS (1992), a saturação dá uma medida do grau de diluição de uma cor pura por uma luz branca, enquanto matiz é um atributo que descreve uma cor pura (amarelo puro, laranja ou vermelho).

Para determinar o matiz, uma cor é escolhida como origem e a partir dela as outras são definidas em termos do ângulo entre a cor e a origem.



FIGURA 9 – O SISTEMA IHS



### 2.11.3 – Análise de Componentes Principais – PCA

As componentes principais são o resultado de uma rotação do sistema original (RGB). Os novos eixos coincidem com as direções de máxima variabilidade, fornecendo uma descrição mais simples da estrutura de covariância (JOHNSON; WICHERN, 1988).

A principal característica das componentes principais é que elas são variáveis independentes, ou seja, a correlação existente entre as bandas no sistema original é eliminada. Ao se analisar a Matriz Variância-Covariância (MVC) de um conjunto de componentes principais, tem-se apenas os elementos diagonais, enquanto todos os outros são nulos. Isso explica por que os eixos são ortogonais e direcionados para a máxima variação.

As componentes principais são obtidas a partir dos autovalores e autovetores da MVC da imagem, também conhecidos na literatura como valores próprios e vetores próprios. Os autovalores obedecem à regra  $|M - \lambda \cdot I| = 0$ , ou seja, o determinante da matriz  $M$ , cujos elementos diagonais foram diminuídos dos autovalores ( $\lambda$ ), deve ser nulo. Após determinarem-se os autovalores, pode-se determinar os autovetores, pois para cada autovalor, corresponde um autovetor. O cálculo dos autovetores é dado pela equação  $\lambda \cdot \underline{e} = M \cdot \underline{e}$ , onde  $\underline{e}$  é o autovetor.

A porção da informação original contida em cada uma das novas componentes está associada ao tamanho do autovalor associado à componente. A contribuição da “i-ésima” componente, num conjunto de  $n$  bandas, pode ser calculada como

$$I_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^n \lambda_k} \quad (21)$$

onde:

- a)  $I_i$  é a contribuição (informação) da “i-ésima” componente;
- b)  $\lambda_i$  é o “i-ésimo” autovalor; e
- c)  $\sum_{k=1}^n \lambda_k$  é soma dos  $n$  autovalores.

A informação contida num subconjunto das novas bandas pode ser calculada somando-se as parcelas atribuídas a cada uma delas. Por exemplo,

$$I_{(1+2)} = I_1 + I_2 = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\sum_{k=1}^n \lambda_k} \quad (22)$$

A vantagem da transformação de uma imagem multiespectral para o sistema PCA é que este permite a representação de mais de três bandas. Um dos critérios usados para escolha das novas variáveis normalmente recai sobre os autovalores, ou seja, autovalores cujo valor seja igual ou maior que a unidade representam uma porção significativa da imagem. Tomando como exemplo uma imagem com sete bandas,  $b_1$  a  $b_7$ ; e verificando que, após a determinação dos seus autovalores e autovetores, apenas três novas variáveis podem representar 95% da informação original, este subconjunto pode ser utilizado para analisar a imagem com pequena perda de informação.

As três novas variáveis, formadas da combinação linear das sete bandas, seriam assim escritas

$$\begin{cases} Y_1 = e_{11} \cdot b_1 + e_{12} \cdot b_2 + e_{13} \cdot b_3 + e_{14} \cdot b_4 + e_{15} \cdot b_5 + e_{16} \cdot b_6 + e_{17} \cdot b_7 \\ Y_2 = e_{21} \cdot b_1 + e_{22} \cdot b_2 + e_{23} \cdot b_3 + e_{24} \cdot b_4 + e_{25} \cdot b_5 + e_{26} \cdot b_6 + e_{27} \cdot b_7 \\ Y_3 = e_{31} \cdot b_1 + e_{32} \cdot b_2 + e_{33} \cdot b_3 + e_{34} \cdot b_4 + e_{35} \cdot b_5 + e_{36} \cdot b_6 + e_{37} \cdot b_7 \end{cases} \quad (23)$$

onde:

- a)  $Y_p$  é a p-ésima componente principal, correspondente ao p-ésimo autovalor;
- b)  $e_{pq}$  é o q-ésimo elemento do p-ésimo autovetor, correspondente ao p-ésimo autovalor; e
- c)  $b_n$  é a n-ésima banda da imagem.

A transformação de imagens por PCA permite, então, que grande parte da informação contida no conjunto original de bandas seja representada com apenas três novas, que são combinações lineares das outras sete.

Para maiores detalhes sobre autovalores, autovetores e suas propriedades, ver JOHNSON e WICHERN (1988).

### 3 – MATERIAL E MÉTODOS

Para verificar a metodologia de atualização de contornos em cartas náuticas através de imagens de vídeo e do sensor HRV-pancromático, utilizou-se uma faixa composta por seis imagens capturadas da câmara de vídeo e uma imagem do satélite SPOT da área de estudo.

As imagens foram capturadas para um microcomputador pessoal padrão IBM-PC (com processador Pentium IV 1,6 GHz e 512 MB de RAM), através de uma placa de captura ASUS GeForce 7700. A dimensão do pixel considerado na matriz de CCD foi de  $7,94\mu\text{m}$ , considerando-se as dimensões horizontal e vertical como sendo de 5,08mm e 3,81mm, formadas por 640 e 480 pixels, respectivamente. Usaram-se os seguintes programas: MATLAB para calibração, aerotriangulação e geração de ortofotos; ENVI para mosaicagem e fusão de imagens; e ArcView para gerar os contornos e os sobrepor às imagens.

#### 3.1 – CÂMARA DE VÍDEO

Usando-se um suporte desenvolvido no SSN-5, filmou-se a área de pesquisa com a câmara de vídeo digital modelo DIGITAL CAMCORDER GR-DVF10U, do fabricante JVC, com um CCD de cerca de 460.000 pixels.

FIGURA 10 – CÂMARA DE VÍDEO JVC GR-DVF10U



O CCD tem a dimensão de  $\frac{1}{4}$  de polegada, ou seja, 6,35mm. Considerando-se esta como uma medida diagonal e fazendo-se com que o comprimento e altura do CCD sejam proporcionais a quatro e três respectivamente, determinam-se os valores de 5,08mm para o comprimento (correspondente ao eixo  $\overline{Ox_F}$ , ver subitem 2.3.2) e 3,81mm para a altura do CCD (correspondente ao eixo  $\overline{Oy_F}$ , ver subitem 2.3.2). Usa-se a proporção 4:3 (comprimento:altura) por ser esta a da maior parte das telas e aplicativos considerados. Mesmo a placa de captura de imagens de vídeo utilizada, com resolução de 640 x 480, usa a proporção de 4:3 (basta dividir os valores da resolução da placa de captura por 160 para confirmar isso).

Segundo a empresa JVC, fabricante do equipamento, a imagem é gravada em formato digital (DV), e o CCD é capaz de formar uma imagem com quinhentas linhas horizontais, o que melhora em muito a resolução. Comparações entre algumas marcas e modelos podem ser encontradas em SPIRO (1999), que diz, em conflito com o fabricante, que a resolução deste modelo é de 480 linhas.

As seguintes etapas foram desenvolvidas para que se tivesse uma metodologia a mais completa possível:

- a) levantamento das coordenadas do campo de calibração;
- b) calibração da câmara de vídeo;
- c) realização de filmagem de vídeo sobre a cidade de Rio Grande (RS), a 10.000 pés de altitude;
- d) captura de uma faixa de seis imagens de vídeo coloridas da área de pesquisa, com uma imagem para cada banda do visível;
- e) levantamento em campo das coordenadas de pontos identificáveis nas imagens;
- f) elaboração de uma malha regular de pontos no programa SURFER;
- g) correção do espalhamento atmosférico nas imagens;
- h) geração de quatro ortoimagens;
- i) mosaicagem das ortoimagens, gerando um ortomosaico;

- j) fusão do ortomosaico com a imagem SPOT-HRV;
- k) verificação da exatidão do ortomosaico;
- l) verificação da contribuição da imagem fundida;
- m) geração de um contorno baseado no ortomosaico, complementado pela imagem fundida; e
- n) comparação visual entre o contorno gerado a partir do ortomosaico e a carta náutica, a fim de determinar as alterações.

### 3.1.1 – Interpolação de Cores na Câmara JVC GR-DVF10U

Os sistemas de cores usados na televisão foram criados também com transformações sobre o sistema RGB, a fim de diminuir a quantidade de informação a ser transmitida, mas também permitir que os televisores antigos, em preto-e-branco, fossem capazes de continuar a receber o sinal de imagem sem a necessidade de qualquer mudança. Após isso, foram adaptados para aplicações que precisavam gravar e mostrar grandes quantidades de informação (imagens coloridas), sem perder tempo para transformá-la em algo que fosse inteligível ao ser humano. A era digital criou a necessidade de sistemas e modelos diferentes para obtenção e até interpolação da informação de cor da imagem.

De acordo com JVC (1998), a interpolação de cores do modelo em questão segue o padrão 4.1.1, ou seja, para cada quatro amostras horizontais de luminância (Y), há uma para cada componente de informação de cor, Cb e Cr. Como cada componente tem cerca de oito bits, cada amostra tem 12 bits (oito bits para Y e quatro bits para Cb e Cr, dois bits para cada).

A figura 11 mostra os sistemas RGB e YCbCr juntos, e pode-se perceber que a quantidade de informação carregada pelo último é muito menor, o que significa que os valores possíveis de informação de cor no bloco YCbCr estão totalmente contidos dentro do sistema RGB. As transformações entre os dois sistemas podem ser encontradas em JACK (2001).

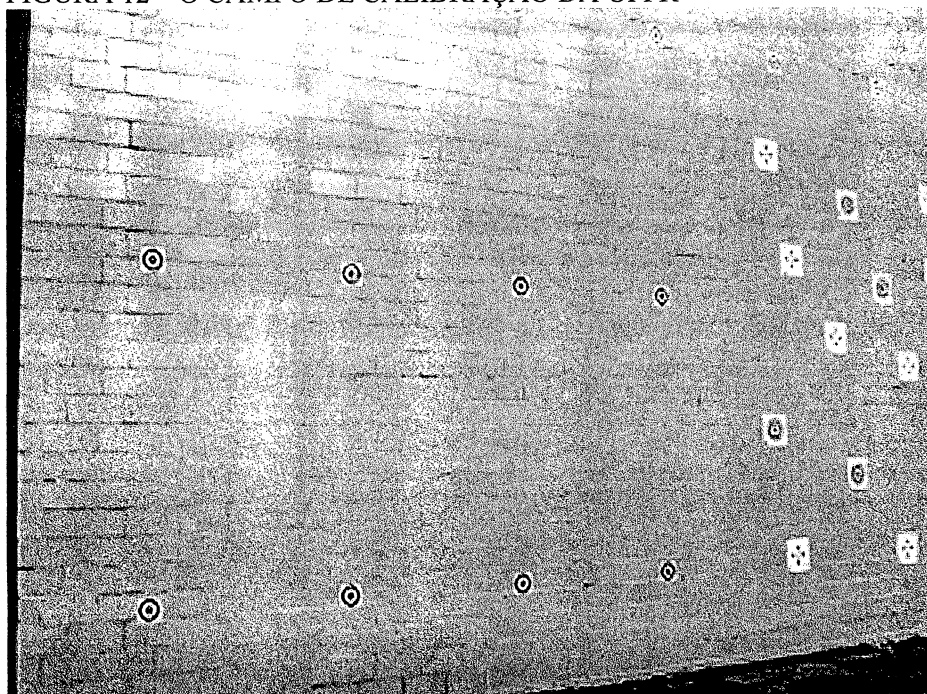


trabalho, utilizou-se o campo de calibração existente na parede externa do bloco VI da UFPR, no Centro Politécnico (figura 12).

As coordenadas dos pontos foram obtidas através de uma interseção avante, medindo-se uma base entre dois teodolitos, e fazendo-se as medições de ângulos horizontais e verticais dos pontos, a fim de obter suas coordenadas  $(X,Y,Z)$ . O referencial fixado como origem foi o teodolito da esquerda. De posse de todas as coordenadas, foi feita uma translação dos eixos para um dos pontos escolhido como nova referência, considerando-se os eixos paralelos, orientados nas mesmas direções, e sem deformações.

Elaborou-se um pequeno programa no aplicativo MATLAB que calculasse todas as coordenadas através da interseção avante, perguntando ao usuário qual o ponto desejado como origem. A partir daí, a translação para a nova origem era feita.

FIGURA 12 – O CAMPO DE CALIBRAÇÃO DA UFPR



Foram, então, tiradas onze fotos do campo de calibração, duas delas sem rotação (em relação à posição normal de uso), três delas com a câmara rotacionada de  $90^\circ$  (no sentido anti-horário) e ângulos de  $0^\circ$  e  $\pm 45^\circ$  (em relação à parede), três delas com uma



rotação de  $180^\circ$  e ângulos de  $0^\circ$  e  $\pm 45^\circ$ , e três delas rotacionadas de  $90^\circ$  (no sentido horário) e ângulos de  $0^\circ$  e  $\pm 45^\circ$ . A partir de doze pontos, foram obtidas cento e trinta e duas leituras, ou seja, duzentas e sessenta e quatro coordenadas para os pontos.

Foi elaborado outro programa também em MATLAB para efetuar o ajustamento pelo método paramétrico com injunções. Este programa lê os pontos em coordenadas no referencial de tela, transforma-os para o referencial fiducial, lê as coordenadas dos pontos no referencial do espaço-objeto, e realiza o ajustamento. É possível selecionar os pontos com os quais se deseja que sejam feitas as injunções de posição e de distância. A convergência é alcançada rapidamente (cerca de dez iterações). O programa pode rodar em qualquer computador pessoal, desde que possua o aplicativo MATLAB e memória suficiente para manipular matrizes de dimensões consideráveis (neste trabalho, matrizes de dimensões consideráveis têm mais de vinte mil elementos, equivalente a uma matriz de duzentas linhas por 100 colunas).

### 3.2.1 – Método das Câmaras Convergentes

O Método das Câmaras Convergentes baseia-se no fato de que fotografias convergentes, ou seja, cuja inclinação entre elas seja de aproximadamente  $90^\circ$ , diminuem a deficiência de posto da matriz de equações normais  $N$  — ver equações (24) — de 8 para 7. A deficiência de posto é o que faz com que a matriz  $N$ , apesar de ter equações superabundantes, seja singular, não se conseguindo uma inversa, a menos que se use uma pseudo-inversa. O significado matemático desta singularidade é simples: falta a materialização de um referencial, por causa da dependência linear entre pares de coeficientes da matriz  $N$ .

Com a convergência entre fotos de aproximadamente  $90^\circ$ , basta que se materialize um referencial, ou seja, é suficiente fixar-se uma estação de exposição em posição e atitude  $(\kappa, \varphi, \omega, X_0, Y_0, Z_0)$ , e deixar que todos os demais feixes ajustem-se livremente em relação ao feixe fixo. Por esta razão, o método foi denominado de “*SELF-CALIBRATION*”, ou “autocalibração” (OLIVAS, 1980).

Sabendo-se que as coordenadas fotogramétricas corrigidas das equações (20), ao serem diminuídas das coordenadas fotogramétricas obtidas das equações de colinearidade (9) devem ser iguais a zero, pode-se escrever que

$$\begin{aligned} F_x &= x_f - x_0 - \delta r_x - \delta d_x - \delta e_x - x = 0 \\ F_y &= y_f - y_0 - \delta r_y - \delta d_y - \delta e_y - y = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

ou, para o caso paramétrico,

$$\begin{aligned} x_f &= x + x_0 + \delta r_x + \delta d_x + \delta e_x \\ y_f &= y + y_0 + \delta r_y + \delta d_y + \delta e_y \end{aligned} \quad (25)$$

As distorções podem ser calculadas a partir de  $(x_f - x_0)$  e de  $(y_f - y_0)$ .

### 3.2.1.1 – Ajustamento

Assim, para o método paramétrico com injunções, o vetor  $X_a$  de parâmetros ajustados, considerado o caso bloco-variante, será dado por

$$\begin{aligned} X_a^T &= [\kappa_1 \quad \varphi_1 \quad \omega_1 \quad X_{0_1} \quad Y_{0_1} \quad Z_{0_1} \quad \cdots \quad \kappa_n \quad \varphi_n \quad \omega_n \quad X_{0_n} \quad Y_{0_n} \quad Z_{0_n} \quad \cdots \\ &\quad X_1 \quad Y_1 \quad Z_1 \quad \cdots \quad X_m \quad Y_m \quad Z_m \quad x_0 \quad y_0 \quad c \quad K_1 \quad K_2 \quad K_3 \quad P_1 \quad P_2 \quad A \quad B] \end{aligned} \quad (26)$$

para  $n$  fotos e  $m$  pontos do espaço-objeto (GALO; HASEGAWA; TOMMASELLI, 2000).

O vetor  $X_a$  vem das seguintes operações matriciais:

$$\begin{aligned} L &= L_0 - L_b \\ N &= A^T \cdot P \cdot A \\ U &= A^T \cdot P \cdot L \\ X &= -N^{-1} \cdot U \\ V &= A \cdot X + L \\ X_a &= X_0 + X \end{aligned} \quad (27)$$

onde:

- $L_0$  é o vetor de valores das observações calculados com os parâmetros aproximados;
- $L_b$  é o vetor de valores observados;
- $P$  é a matriz dos pesos;
- $X_0$  é o vetor de valores dos parâmetros aproximados ou ajustados na  $i$ -ésima iteração;
- $X$  é o vetor de correções ao vetor  $X_0$ ;
- $V$  é o vetor de resíduos das observações;
- $X_a$  é o vetor de parâmetros ajustados; e
- $A$  é a matriz de derivadas parciais da função utilizada como modelo matemático, definida pelos valores em  $X_0$ , ou seja

$$\left. \frac{\partial F}{\partial X} \right|_{X_0} \quad (28)$$

Por ser o ajustamento não linear, e necessitar iterações para convergir aos valores ajustados, pode ocorrer a convergência desejada, ou uma divergência, ou mesmo uma convergência a valores incorretos. Por este motivo, a qualidade do ajustamento deve ser verificada. Para tal, testes podem ser aplicados, desde que seja estabelecida uma hipótese básica. Normalmente, admite-se que a variância da observação de peso unitário *a priori* é igual à unidade, ou seja,

$$\begin{cases} \hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T \cdot P \cdot V}{S} \\ \sigma_0^2 = 1 \\ P = Q^{-1} = \sigma_0^2 \cdot \Sigma_{L_b}^{-1} \end{cases} \quad (29)$$

onde:

- $\sigma_0^2$  é a variância *a priori*;

- $\hat{\sigma}_0^2$  é a variância *a posteriori*;
- $S$  é o número de graus de liberdade do ajustamento;
- $P$  é a matriz dos pesos, vista em (24); e
- $Q$  é a matriz inversa das precisões das observações ( $\Sigma_{L_b}^{-1}$ ), multiplicada pela variância da observação de peso unitário *a priori* ( $\sigma_0^2$ ).

Por isso é que se admite em alguns casos que a matriz dos pesos seja igual à inversa das variâncias das observações, e, havendo possibilidade, para maior simplificação, considera-se também que as observações são não-correlacionadas, reduzindo a matriz de pesos a uma matriz diagonal.

Após o ajustamento, verifica-se se o valor de  $\hat{\sigma}_0^2$  — obtido utilizando-se a equação (29) — encontra-se dentro de um intervalo de confiança. O teste estatístico utilizado neste trabalho foi o de percentis da distribuição qui-quadrado, no qual se verifica se o valor calculado de qui-quadrado ( $\chi^{*2}$ ) está dentro do intervalo do nível de significância escolhido. O teste estatístico é dado por:

$$\begin{aligned}\chi^{*2} &= \hat{\sigma}^2 \cdot S \\ \chi_{v, \frac{\alpha}{2}}^2 &< \chi^{*2} < \chi_{v, 1 - \frac{\alpha}{2}}^2\end{aligned}\tag{30}$$

onde:

- $v$  é o número de graus de liberdade; e
- $\alpha$  é o nível de significância.

Os valores de  $\chi_{v, \frac{\alpha}{2}}^2$  e  $\chi_{v, 1 - \frac{\alpha}{2}}^2$  podem ser retirados de uma tabela ou calculados por programas. A definição de tais valores é dada como a área sob a curva de percentis da distribuição de qui-quadrado, ou

$$\int_0^{\chi_{1-\alpha}^2} \phi(\chi^2) \cdot d\chi^2 = 1 - \alpha\tag{31}$$

Outro indicador que pode ser utilizado para verificar a qualidade de um ajustamento é o erro médio quadrático. O erro médio quadrático pode ser calculado em função dos resíduos das observações ( $V$ ), ou seja

$$m = \hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}} \quad (32)$$

onde:

- $\sum v_i^2$  é o somatório dos quadrados dos resíduos; e
- $n$  é o número de observações.

A matriz  $A$  — equações (24) —, de derivadas das funções em relação aos parâmetros, não deve ser confundida com o parâmetro de distorção  $A$ , das equações (19). Para maiores detalhes sobre o método paramétrico com injunções, ver MITISHITA (1997) e ANDRADE e OLIVAS (1981).

### 3.3 – FILMAGEM, HELICÓPTERO E PLANEJAMENTO DE VÔO

Não existem grandes diferenças entre o planejamento do vôo aerofotogramétrico e do videogramétrico. Um detalhe que pode ser considerado é a resolução desejada, função do tamanho do sensor da matriz da câmara de vídeo, ou mesmo da resolução utilizada no referencial de tela.

O helicóptero utilizado foi um UH-12 Esquilo monoturbinado, do 5º Esquadrão de Helicópteros de Emprego Geral, da Marinha do Brasil, situado na cidade de Rio Grande (RS). Foi realizado em 24 de outubro de 2001 um vôo à altitude de 10.000 pés (aproximadamente 3.050 metros) sobre a cidade e sua área litorânea. A altitude de vôo foi limitada pelo teto máximo em que se pode respirar sem auxílio de máscaras de oxigênio, além da margem de segurança de operação da aeronave.

Outros helicópteros navais poderiam ter sido utilizados, talvez até com melhores resultados, por serem alguns maiores e mais pesados, o que permitiria voar com maior estabilidade. Outros helicópteros maiores que o Esquilo, em uso pela Marinha do Brasil, são o Super Puma, o SuperLynx e o Sea King.

Apesar de não serem as melhores aeronaves para fins fotogramétricos, os helicópteros permitem uma maior manobrabilidade e flexibilidade de voo, o que é contrabalançado pelos limites de operação mais baixos que aviões e por maiores trepidações.

Para se realizar um voo em que a resolução espacial da câmara de vídeo coincidissem com a da imagem SPOT, seria necessário voar a cerca de 28.000 pés, ou quase 8.600m, impedindo a realização do trabalho por aeronaves de asa rotativa. Optou-se, então, por realizar o voo à altitude máxima que permitisse a realização do presente trabalho (10.000 pés), quer dizer, que respeitasse os limites de operação da aeronave e de segurança da tripulação do helicóptero.

A câmara foi afixada na barriga da aeronave, usando-se um suporte desenvolvido no SSN-5, a partir de refugos. Para amenizar as vibrações do helicóptero foram colocadas tiras de borracha dentro do suporte. Como não havia meio de ligar a câmara de dentro da aeronave, nem acompanhar as imagens que estavam sendo feitas, a câmara era ligada quando o piloto informava estar pronto para decolar, após ter cumprido a lista de verificação para decolagem. Numa futura versão do mesmo aparato, é intenção poder capturar as imagens ainda a bordo da aeronave.

### 3.3.1 – Afastamento entre as Faixas

As dimensões consideradas da matriz de sensores foram 5,08mm e 3,81mm, respectivamente, tamanhos dos eixos  $\overline{Ox_F}$  e  $\overline{Oy_F}$ . Mas o número de pixels a ser considerado para fins de planejamento deve ser o do formato utilizado pela placa de captura de imagens; no caso, 640 x 480. Usando-se a relação entre altura e distância focal, consegue-se saber a escala a ser considerada. Para uma distância focal de 6,825mm, com

uma altura de vôo de 3.050m, a escala entre espaço-objeto e espaço-imagem é 1:446.860. Com isso, as dimensões no terreno de uma cena capturada pela câmara de vídeo seriam de 2.270m por 1.702,5m.

Como se trata de uma filmagem videogramétrica, não há necessidade de calcular o intervalo entre a tomada de imagens; basta apenas garantir, na captura dos quadros, que se tenha um recobrimento de cerca de 60%.

Para calcular o afastamento entre as faixas, deve-se ter em mente o recobrimento desejado. Para o presente trabalho, o afastamento entre faixas considerado foi de 30%. Tomando-se este recobrimento, a distância entre faixas foi:

$$(1 - 0,3) \cdot 1.702,5 = 1.191,75m$$

Este valor foi utilizado para calcular doze faixas no sentido norte-sul e sul-norte, cobrindo toda a cidade de Rio Grande (RS). Isso foi necessário porque, com a grande variação de condições meteorológicas (característica da área), dever-se-ia garantir que houvesse na área de estudos uma região apropriada para o desenvolvimento do trabalho.

As coordenadas de início e fim de cada faixa foram retiradas da carta náutica do porto de Rio Grande e introduzidas num equipamento GPS de bordo da aeronave, permitindo voar sobre as faixas planejadas.

### 3.3.2 – Imagens de Vídeo Digital

As imagens digitais foram capturadas para um microcomputador pessoal, a fim de que pudessem ser manipuladas, através de uma placa de captura (independente da placa de vídeo), que permite receber os dados em três formatos: 640 x 480; 320 x 240; ou 160 x 120 (colunas x linhas), sempre mantendo a razão 4:3. Estes formatos são os utilizados para o referencial de tela. O recobrimento utilizado foi de cerca de 60% no eixo de deslocamento, isto é, coincidente com o eixo  $\overline{Ox_F}$  (subitem 2.3.2).

Considerando a altitude de vôo de 10.000 pés (3.050m) e o formato de 640 x 480 — empregado neste trabalho —, o tamanho do pixel no terreno é de cerca de 3,5m. Para o

formato de 320 x 240, é de 7m, enquanto que para o formato de 160 x 120, é de 14m. As imagens foram escolhidas de acordo com três critérios:

- a) necessidade de atualização do contorno;
- b) cobertura de nuvens; e
- c) quantidade de pontos de apoio.

Sobre o sinal da imagem que deve ser enviado da câmara à placa de captura do computador, a fabricante JVC não respondeu aos e-mails que lhe foram enviados pelo autor a fim de fornecer as especificações do CCD da câmara empregada. As informações no manual e na página da empresa são muito superficiais e não entram em detalhes da matriz de sensores. A JVC é, por ora, a líder no mercado de câmaras digitais pela qualidade de seus equipamentos, e é natural que queira privilegiar o acesso às informações técnicas deles. Como dito no subitem 3.1, a imagem gerada pela câmara tem quinhentas linhas. Admitindo-se que tenha setecentas e vinte colunas, a imagem seria de dimensões 720 linhas x 500 colunas. Assim sendo, como o formato escolhido para a placa de captura de imagem foi de 640 linhas x 480 colunas, existe uma interpolação em linhas e colunas da imagem original para obter o formato exibido na tela do computador.

### 3.3.3 – Espalhamento e Correção Atmosférica

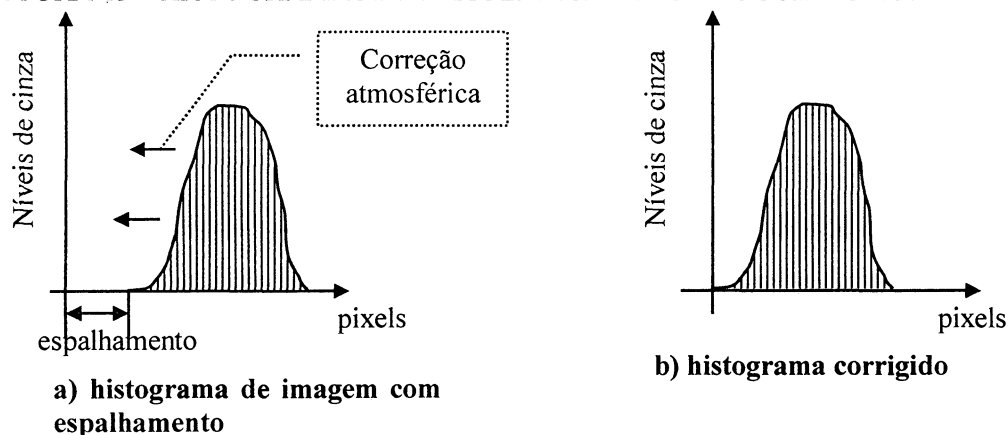
O espalhamento é o efeito sofrido pela energia (luminosa, no caso), por causa da atmosfera, que altera a direção do raio luminoso, espalhando-o. Distribui a energia luminosa aleatoriamente, e tem maior influência nos menores comprimentos de onda. Faz com que a imagem aérea tenda a ficar azulada, por ser o azul a faixa do visível que mais sofre o efeito do espalhamento. Ao se verificar um histograma, observa-se que o espalhamento causa um deslocamento dos valores para a direita, aumentando a radiância, que é representada na imagem por seus níveis de cinza.

A maneira mais comum de corrigir o espalhamento é usando uma correção do efeito atmosférico. Contudo, modelar o efeito atmosférico e obter uma correção eficaz é, por vezes, inviável. O que se faz normalmente é procurar na imagem um ponto onde a



radiância seja próxima de zero (uma sombra, por exemplo), verificar o valor de seu nível de cinza na imagem, e diminuir esse valor de todos os níveis de cinza da imagem. A figura 13 ilustra o efeito da correção de uma imagem espalhada, através de histogramas.

FIGURA 13 – HISTOGRAMAS DE IMAGEM ESPALHADA E CORRIGIDA



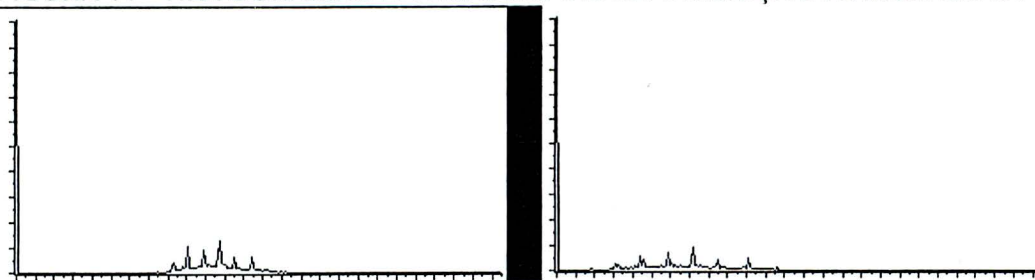
Formalmente, a correção do efeito atmosférico é dada por

$$NC_C = NC - atm \quad (33)$$

$NC_C$  é o nível de cinza corrigido,  $NC$  é o nível de cinza original, e  $atm$  é a parcela de espalhamento atmosférico responsável pelo deslocamento do histograma à direita.

As imagens coletadas apresentavam necessidade de correção do efeito atmosférico por causa do espalhamento. A correção foi feita através do programa ENVI, traçando os histogramas de cada imagem, e retirando o excesso de radiância para compensar o espalhamento. A figura 14 mostra um histograma antes e depois da correção. O histograma da esquerda é original e seu limite mínimo está no nível de cinza 63, o da direita é o resultado da aplicação da correção do efeito atmosférico. Observa-se que no histograma esquerdo inferior o limite mínimo é 0, ou seja, a correção atmosférica foi aplicada. Com isso, considerou-se o espalhamento eliminado.

FIGURA 14 – HISTOGRAMAS ANTES E DEPOIS DA CORREÇÃO ATMOSFÉRICA



### 3.3.4 – Aerotriangulação

Como dito no subitem 2.6, a Aerotriangulação visa a determinar as coordenadas de pontos fotoidentificáveis em imagens, através de um reduzido conjunto de pontos de apoio. Neste trabalho, a intenção não era determinar coordenadas de pontos, mas sim determinar os parâmetros de orientação exterior ( $\kappa, \varphi, \omega, X_0, Y_0, Z_0$ ) das seis imagens componentes da faixa escolhida da área de pesquisa, a fim de poder restabelecer a geometria projetiva de cada imagem.

Deve-se ter em mente que a imagem necessariamente terá de conter somente terra em sua quase totalidade, deixando a parte litorânea como um de seus extremos, a fim de que se possa garantir uma boa aerotriangulação; caso contrário, os resultados terão baixa acurácia. Uma das possíveis formas de resolver este problema seria obter uma faixa ou bloco com boa aerotriangulação, mas com deficiências na obtenção do contorno (pontões, por exemplo) e realizar uma fusão com uma imagem SPOT pancromática previamente georreferenciada. Outra forma de resolução seria um voo mais baixo na parte não coberta, de modo a permitir que fosse feita uma resseção espacial, ortoretificando esta mesma imagem em separado, e depois juntá-la ao ortomosaico.

A fim de homogeneizar resultados, foi utilizado o ajustamento da faixa simultaneamente, através de um ajustamento em bloco (*bundle-block adjustment*). O modelo utilizado são as equações de colinearidade, vistas no subitem 2.4. Os parâmetros são similares ao da equação (26), apenas com a diferença de que não existem parâmetros

de calibração calculados pelo ajustamento. Também é utilizado o mesmo método de ajustamento da calibração, ou seja, paramétrico com injunções de posição.

Foi criado um programa no aplicativo MATLAB para calcular o ajustamento, que lê os arquivos de coordenadas planialtimétricas de pontos e de coordenadas em linha e coluna dos correspondentes pontos fotoidentificáveis. É possível escolher quais pontos injuncionar. Os dados de saída são arquivos de parâmetros de orientação exterior para cada imagem, de coordenadas planialtimétricas dos pontos ajustados, e a matriz variância-covariância do ajustamento.

Assim, para o método paramétrico com injunções, o vetor  $X_a$  de parâmetros ajustados, considerado o caso bloco-variante, será dado por

$$X_a^T = \begin{bmatrix} \kappa_1 & \varphi_1 & \omega_1 & X_{0_1} & Y_{0_1} & Z_{0_1} & \cdots & \kappa_n & \varphi_n & \omega_n & X_{0_n} & Y_{0_n} & Z_{0_n} & \cdots \\ & X_1 & Y_1 & Z_1 & \cdots & X_m & Y_m & Z_m \end{bmatrix} \quad (34)$$

para  $n$  imagens e  $m$  pontos do espaço-objeto.

Com seis imagens e vinte e três pontos, são encontrados ao todo cento e cinco parâmetros. Com cinquenta e cinco pontos lidos, tendo duas equações para cada ponto, obtêm-se cento e dez observações, o que por si só garantiria a abundância de observações e o sucesso do ajustamento, não fosse a singularidade da matriz  $N$ , uma vez que existem cinco graus de liberdade. Foram injuncionados sete pontos, aumentando o número de graus de liberdade de cinco para vinte e seis (pois cada ponto injuncionado gera mais três equações).

Reitera-se que o interesse na aerotriangulação era determinar os parâmetros de orientação exterior, a fim de gerar ortofotos a partir das imagens de vídeo. Determinar e comparar coordenadas era necessário apenas para verificar a exatidão planialtimétrica do ajustamento.

### 3.4 – INFORMAÇÕES DE ALTIMETRIA E MALHA REGULAR

As informações de altimetria dos pontos de controle foram conseguidas através de um levantamento GPS estático realizado por uma equipe volante do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), na cidade de Rio Grande e área metropolitana, durante o mês de abril de 2001, complementado por um adensamento — também através de levantamentos GPS estáticos — feito em maio de 2002. Foram usados ao todo vinte e três pontos.

As coordenadas obtidas dos pontos de apoio foram rastreadas com receptores Trimble 4000 SSI e Ashtech Pormark CM, e pós-processadas com erro médio de 1cm na planimetria e 5cm na altimetria. O receptor Trimble 4000 SSI foi colocado no Radiofarol de Rio Grande, um ponto de coordenadas conhecidas, determinadas com precisão de 1mm, com posicionamento relativo, baseado na Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo. Assim, as coordenadas dos pontos injuncionados foram determinadas com o método de posicionamento relativo. As coordenadas dos pontos não injuncionados foram obtidas através de um procedimento do receptor GPS, no qual este calcula a média de um número de posições obtidas num determinado período, ou seja, um posicionamento absoluto. Para o caso deste trabalho, o período empregado foi de cinco minutos, o que significa realizar a média de 200 posições (para cada ponto). As coordenadas foram transformadas para o sistema UTM, em direções *N* e *E*, zona 22, considerando a altimetria em metros e referenciada ao nível médio dos mares (MSL).

As coordenadas planialtimétricas dos vinte e três pontos foram utilizadas para gerar um arquivo inicial, de extensão .DAT, servindo de base para que o programa SURFER gerasse um MDT do terreno. O método de modelagem da superfície utilizado foi Kriging, que é um método geoestatístico e se adapta melhor a pontos irregularmente espaçados, como é o caso. Possui melhor capacidade de suavização que métodos como vizinho mais próximo.

Foi gerado um MDT de toda a área de estudo com intervalo de 3,5 metros nas direções *N* e *E*, correspondente à resolução espacial da câmara de vídeo, com extensão .GRD, que é a grade de pontos interpolados a partir dos vinte e três pontos iniciais. Isso significa que para cada pixel devem existir as correspondentes coordenadas no espaço-objeto.

Na verdade, ao ser gerada a malha regular, o intervalo entre os nós na direção *E* foi de 3,5027m, enquanto que na direção *N* foi de 3,50014m. A princípio, pensou-se em usar um espaçamento de 10m, referente ao tamanho do pixel da imagem pancromática SPOT no terreno, entretanto, tendo em vista a melhor resolução geométrica da câmara de vídeo, o espaçamento da malha regular foi reduzido para 3,5 metros.

Após isso, o MDT foi salvo como uma malha regular no formato *ASCII* (*American Standard Code for Information Interexchange* – Código Americano Padrão para Intercâmbio de Informações), com extensão .DAT, a fim de facilitar a leitura do arquivo pelo programa que foi desenvolvido no aplicativo MATLAB.

A priori, poder-se-ia dizer que gerar uma malha regular a partir de apenas vinte e três pontos seria um contra-senso, contudo, a região permite que isso seja feito, em virtude das mínimas variações altimétricas da área de estudo, que é bastante plana. As edificações (prédios, galpões, etc.) foram consideradas com cota nula.

Finalmente, para cada imagem foi extraída a parte correspondente da malha regular, uma vez que esta abrangia toda a área de estudo. Desta forma, reduz-se o esforço computacional, pois o computador somente faz cálculos para a imagem que se pretenda ortorectificar.

### 3.5 – ORTOFOTOS

Foi desenvolvido um programa em MATLAB para gerar ortofotos. O programa lê a imagem capturada — que não sofreu correção alguma —, lê a malha regular da área da

imagem, aplica as equações de colinearidade, obtendo as coordenadas fotogramétricas, adiciona os erros sistemáticos a elas, transforma as coordenadas de fotogramétricas para fiduciais e posteriormente de fiduciais para linha x coluna, e finalmente interpola o nível de cinza (por interpolação bilinear), mapeando a nova imagem pelo processo inverso. Para gerar ortofotos coloridas, foi necessário realizar este processo para cada uma das três bandas (*RGB*).

### 3.5.1 – Retificação de Imagens pelo Método Indireto

Uma vez calculados todos os parâmetros de orientação exterior de uma imagem ( $\kappa, \varphi, \omega, X_0, Y_0, Z_0$ ), pode-se, com um Modelo Digital do Terreno (MDT), obter os valores de  $x_p$  e  $y_p$  (coordenadas fotogramétricas), referentes a uma projeção ortogonal, a partir das equações de colinearidade (09). Como as novas coordenadas fotogramétricas, ao serem transformadas para o referencial de tela, dificilmente estarão no mesmo local que as correspondentes e nem serão números inteiros, deve-se proceder a uma interpolação dos níveis de cinza, a fim de obter o valor digital correspondente à nova posição do pixel.

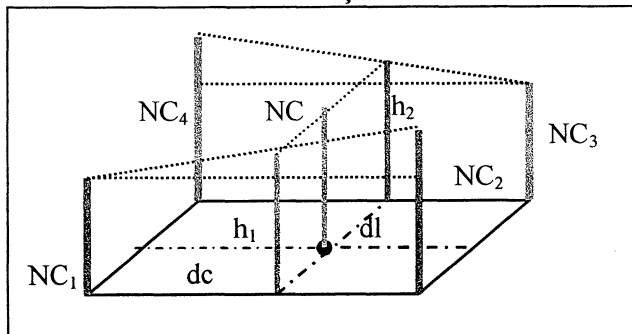
Os métodos de interpolação de níveis de cinza mais conhecidos e utilizados são: vizinho mais próximo; interpolação bilinear; e convolução cúbica. A interpolação para o vizinho mais próximo, como o próprio nome diz, admite ser o valor digital do pixel o do seu vizinho mais próximo. É também chamada na literatura de interpolação de ordem zero (GONZALEZ; WOODS, 1992). É a solução mais rápida e que exige menos transformação dos níveis de cinza originais (CHUVIECO, 1990). Isso causa, entretanto um “serrilhamento” das bordas da imagem, bem como reforça o contraste entre níveis de cinza de pixels adjacentes, cujos valores digitais sejam muito diferentes.

A interpolação bilinear considera os quatro pixels próximos da nova posição, solucionando o novo nível de cinza por duas interpolações entre linhas (daí o nome) e uma entre colunas. Para melhor entender este conceito, pode-se pensar na interpolação bilinear como uma média ponderada, onde as menores distâncias seriam os maiores pesos. O nível de cinza do pixel mais próximo tem mais influência que os níveis de cinza de

pixels mais afastados. Isso causa uma suavização da imagem, impedindo a formação de bordas “serrilhadas”, e permitindo transições menos abruptas. Tem como desvantagem a tendência de diminuir o contraste espacial da imagem original, ou seja, tornar difusas as regiões de bordas, reduzindo sua definição (CHUVIECO, 1990).

Considerando-se os níveis de cinza de cada um dos quatro pixels adjacentes à posição encontrada como alturas, pode-se pensar na resolução da interpolação bilinear por semelhança de triângulos, calculando-se primeiro as alturas intermediárias para a diferença de coluna, depois a altura final para a diferença de linha. A interpolação pode ser melhor entendida através da figura 15.

FIGURA 15 – INTERPOLAÇÃO BILINEAR



$$\begin{aligned}
 h_1 &= dc \cdot (NC_2 - NC_1) + NC_1 \\
 h_2 &= dc \cdot (NC_4 - NC_3) + NC_3 \\
 NC &= dl \cdot (h_2 - h_1) + h_1
 \end{aligned}
 \tag{35}$$

onde:

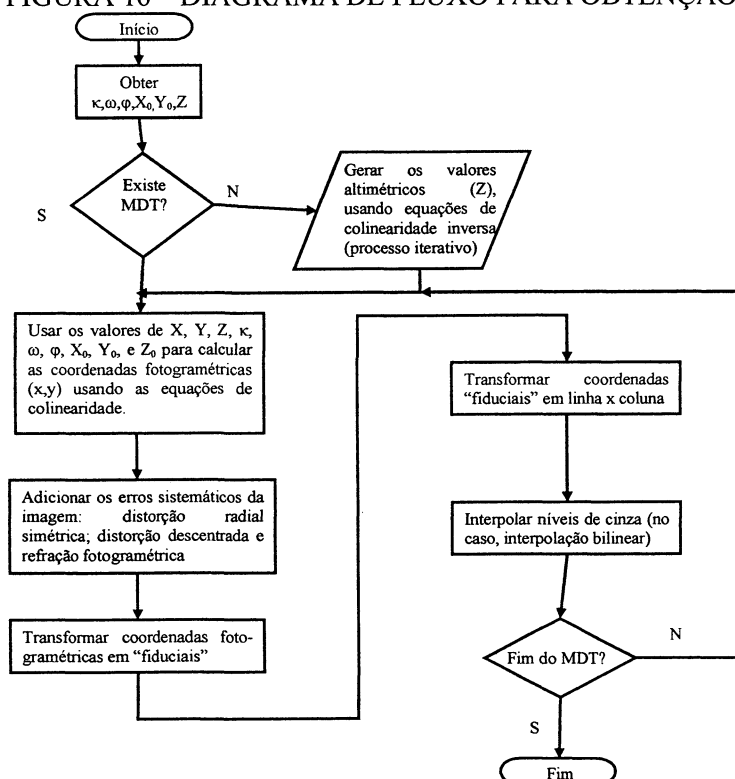
- $NC_1, NC_2, NC_3$ , e  $NC_4$  são os níveis de cinza dos pixels adjacentes;
- $dc$  é a diferença de valor entre a primeira coluna adjacente e a coluna da posição encontrada;
- $dl$  é a diferença de valor entre a primeira linha adjacente e a linha da posição encontrada;
- $h_1$  e  $h_2$  são os valores de cinza intermediários; e

- $NC$  é o nível de cinza interpolado.

A interpolação por convolução cúbica também faz suavizações e permite melhores transições, considerando os dezesseis pixels próximos. A diferença entre este método de interpolação e o anterior é não somente o número de pixels a serem considerados, mas também o método de resolução, pois a convolução cúbica ajusta polinômios de terceiro grau às linhas e colunas numa vizinhança  $4 \times 4$ . O esforço computacional é também muito maior.

A figura 16 mostra um fluxograma de trabalho para obtenção de uma ortofoto a partir de uma imagem de vídeo digitalizada.

FIGURA 16 – DIAGRAMA DE FLUXO PARA OBTENÇÃO DE ORTOFOTOS





### 3.6 – MOSAICAGEM

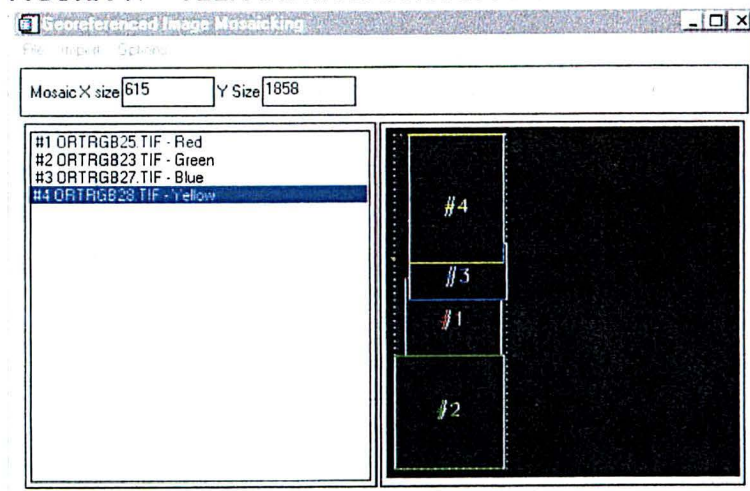
O programa ENVI foi utilizado para fazer o mosaico das ortofotos. Dos seis quadros iniciais, foram obtidas quatro ortofotos, ou seja, doze imagens de vídeo retificadas, uma para cada banda, todas salvas em formato TIFF, não comprimidas. Sabendo-se o tamanho da imagem correspondente à área do MDT por ela coberta, bem como os intervalos em  $E$  e  $N$  em metros, pode-se gerar um arquivo com extensão .TFW, que orienta as imagens supracitadas — um arquivo para cada imagem —, georreferenciando-as.

O arquivo de extensão .TFW deve necessariamente ter o mesmo nome da imagem TIFF ao qual está associado. É um arquivo gerado em *ASCII*, que pode ser feito no próprio bloco de notas do ambiente Windows, lembrando-se de que não se deve salvá-lo com a extensão “default”, ou seja, .TXT, mas sim com a extensão .TFW. Ele é composto por seis linhas, a saber:

- a) espaçamento entre os pixels em  $x$ , ou seja, em  $E$  (no caso, 3,5m);
- b) rotação em graus em  $x$  (no caso, 0°);
- c) rotação em graus em  $y$ , ou seja, em  $N$  (no caso, 0°);
- d) espaçamento entre os pixels em  $y$  (no caso, -3,5m);
- e) coordenada  $E$  do canto superior esquerdo; e
- f) coordenada  $N$  do canto superior esquerdo.

A figura 17 mostra a tela de mosaicagem de imagens georreferenciadas do programa ENVI.

FIGURA 17 – TELA DE MOSAICAGEM DO PROGRAMA ENVI



O canto de referência é o superior esquerdo, o que significa dizer que para as coordenadas  $E$  o espaçamento entre pixels será positivo — pois os valores de  $E$  aumentam para leste, que é a direita da imagem —, enquanto que para as coordenadas  $N$  o espaçamento entre pixels é negativo — pois os valores de  $N$  diminuem para o sul, que é a parte inferior da imagem. Com isso, o programa ENVI é capaz de mosaicar as ortofotos, montando uma ortoimagem georreferenciada.

Como para cada pixel existem as respectivas coordenadas  $X$ ,  $Y$ , e  $Z$  no espaço-objeto, e como a malha regular foi gerada para toda a área e depois dela foram extraídas malhas regulares relativas a cada imagem ortoretificada, não há necessidade de efetuar rotações, deslocamentos ou mudanças de escala para mosaicar as ortofotos geradas. Além do mais, cada arquivo de extensão .TFW já indica que as rotações são iguais a zero, e que os espaçamentos são iguais. Basta apenas ao programa ENVI estabelecer uma referência (canto superior esquerdo do ortomosaico) e colar as imagens nas coordenadas corretas.

### 3.7 – CORREÇÃO GEOMÉTRICA DA IMAGEM DO SATÉLITE SPOT

Efetuar a correção geométrica de uma imagem significa tornar a imagem correspondente com a realidade do terreno imageado, minimizando ou eliminando as distorções geométricas. Neste trabalho, a princípio pensou-se em corrigir a imagem HRV-pancromática utilizando-se como pontos de controle aqueles cujas coordenadas foram levantadas por uma equipe volante da DHN em abril de 2001. A correção desta imagem foi realizada com quinze pontos de controle e oito de verificação. O erro máximo encontrado foi de cerca de doze metros, o que é bastante satisfatório, já que a imagem possui resolução geométrica de dez metros. No entanto, a imagem não foi corrigida desta maneira, pois a resolução geométrica da imagem de vídeo no terreno (IFOV) era de 3,5m, tornando mais atrativo um registro imagem a imagem, tendo como base a faixa de ortofotos mosaicada. O erro deste registro foi de aproximadamente 7m, mas a imagem teve que ser interpolada, em virtude das diferenças de resolução geométrica.

Optou-se por não ortoretificar a imagem pancromática SPOT pelo erro menor apresentado no registro imagem a imagem realizado com o ortomosaico. Ortoretificar a imagem SPOT não traria grande melhoria, pois sua resolução espacial é menor que a da imagem de vídeo. Ao se realizar o registro imagem a imagem usando como base o ortomosaico, pode-se usar imediatamente a imagem pancromática SPOT resultante para realizar uma fusão com o mosaico de imagens ortoretificadas. Assim sendo, ortoretificar a imagem pancromática SPOT torna-se um trabalho desnecessário, em virtude do erro maior que teria esta imagem em relação à imagem registrada com base no ortomosaico.

O método de registro usado através do programa ENVI foi o *RST – Rotation, Scale and Translation* (Rotação, Escala e Translação), ou seja, uma transformação afim no plano. As equações usadas para a transformação afim no plano têm seis parâmetros:  $a$ ;  $b$ ;  $c$ ;  $d$ ;  $x_0$ ;  $y_0$ . Podem ser escritas da seguinte forma matricial:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Foi utilizado o método de interpolação bilinear (visto no subitem 3.5.1) para reamostrar a imagem SPOT, pois foi necessário compatibilizar sua resolução espacial (10m) com a resolução espacial do ortomosaico (3,5m). O processo de reamostragem fez com que a imagem parecesse estar ligeiramente fora de foco. O efeito prático da reamostragem com o fim de compatibilizar a resolução espacial, neste caso, é como se estivesse aumentando a imagem SPOT (“*zooming*”), sem, no entanto, aumentar sua resolução espacial. Com a interpolação bilinear, não se formam bordas serrilhadas na imagem, mas uma suavização entre tons de cinza limítrofes, assemelhando-se a uma imagem um pouco desfocada.

### 3.8 – FUSÃO DE IMAGENS

À definição do tema deste trabalho, já se sabia da utilização de câmaras de vídeo para fins videogramétricos, e por toda a revisão bibliográfica se vê autores que citam que um dos maiores problemas para a utilização dos referidos equipamentos é a pobre resolução geométrica. Pensou-se então que uma fusão de imagens geradas por uma câmara de vídeo comum teriam a baixa resolução geométrica compensada pela imagem HRV-pancromática do satélite SPOT. Entretanto, verificou-se que as imagens de vídeo obtidas no vôo efetuado para esta pesquisa eram espacialmente melhores que as do satélite.

Tratou-se então de tentar utilizar a imagem SPOT como base para uma possível detecção automática de bordas, mais especificamente, da linha de costa. Isto seria feito através da fusão da imagem SPOT com a ortoimagem, gerando uma imagem híbrida colorida, com a resolução geométrica do satélite. O programa ENVI foi utilizado para

fundir a ortoimagem de vídeo com a imagem pancromática SPOT, usando o método de substituição da banda de intensidade do ortomosaico pela banda pancromática do satélite.

### 3.8.1 – Fusão de Imagens por Substituição de Banda

A fusão de imagens tem sido um procedimento largamente por causa do modo complementar em que os vários conjuntos de dados atuam entre si (ANDERSON; CHAVEZ; SIDES, 1991). Os métodos de fusão de imagens mais difundidos são os por substituição de bandas. Existem alternativas para efetuar a fusão, como os métodos de fusão pixel a pixel (SCHOWENGERDT, 1980). No presente trabalho só se discorrerá sobre o método de fusão de imagens por substituição de bandas.

O processo inclui as seguintes etapas:

- a) registro das imagens, para que cada ponto de uma imagem corresponda ao mesmo na outra imagem;
- b) compatibilização da resolução espacial;
- c) transformação da imagem RGB para IHS ou PCA;
- d) aplicação de uma transformação linear ao histograma da banda complementar, para torná-lo compatível com o da imagem transformada;
- e) substituição da banda de intensidade (IHS) ou da banda da primeira componente principal (PCA) pela banda de maior resolução espacial; e
- f) retorno da imagem com a banda substituída para o sistema RGB.

O processo de substituição de bandas baseia-se no fato de que a banda de intensidade — ou a banda da primeira componente principal — possui informação de todas as bandas da imagem (no sistema RGB) e, portanto, informação comum a todas as bandas da imagem no sistema RGB. Sendo assim, pequenas variações, ou seja, detalhes, seriam concentrados nas bandas HS (sistema IHS) ou nas outras componentes principais (sistema PCA).

Os dados da primeira componente principal em geral se aproximam à informação contida na banda pancromática. CHAVEZ e KWARTENG (1989) afirmaram que se pode presumir isso porque a primeira componente principal terá a informação que é comum a todas as bandas usadas para a transformação de RGB a PCA, enquanto a informação espectral particular a cada banda será mapeada às outras componentes.

Substitui-se, então, a banda que tem informação comum às três bandas RGB pela banda pancromática, e retorna-se ao sistema RGB. O resultado, então, é uma imagem colorida. Entretanto, CARPER, LILLESAND e KIEFER (1990) enunciaram que se deve assegurar que a banda pancromática mantenha uma forte correlação com a banda de intensidade do conjunto multiespectral. De outra maneira, pequenas variações de intensidade podem ser obscurecidas.

Neste trabalho empregou-se a fusão de imagens por substituição de bandas, usando a conversão do sistema de cor RGB para IHS. O histograma da banda pancromática do satélite SPOT foi linearizado de forma a ser compatível com o da banda de intensidade do ortomosaico. Feito isto, a banda de intensidade foi substituída pela imagem pancromática e foi convertida de volta para o sistema RGB. Foi também feita uma experiência com a transformação do sistema RGB para PCA, mas o resultador foi pior, sendo então esta última descartada.

### 3.9 – DIGITALIZAÇÃO DE FEIÇÕES

Para digitalizar as feições da carta náutica de interesse para o navegante, usou-se o programa ARCVIEW. Foram digitalizadas a linha de costa e algumas edificações, projeções de terra sobre água feitas pelo homem, bem como uma pequena parte da malha viária. Estas feições foram escolhidas para demonstrar que é preciso alterar a carta náutica da área de estudo, a fim de que ela possa refletir a realidade, que já é diferente do que é mostrado.

Como a intenção é criar uma imagem vetorizada, a fim de poder atualizar diretamente a carta náutica, usa-se o programa ARCVIEW para gerar a primeira, manualmente, o que permite alterar a segunda. As alterações são detectadas visualmente por um operador, e vetoriza-se no programa ARCVIEW o novo contorno, a ser salvo num arquivo com extensão .DXF, que pode ser aberto em alguns programas específicos para editoração eletrônica de cartas náuticas, como o Microstation SE, com módulo IRAS-C, em uso na DHN.

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

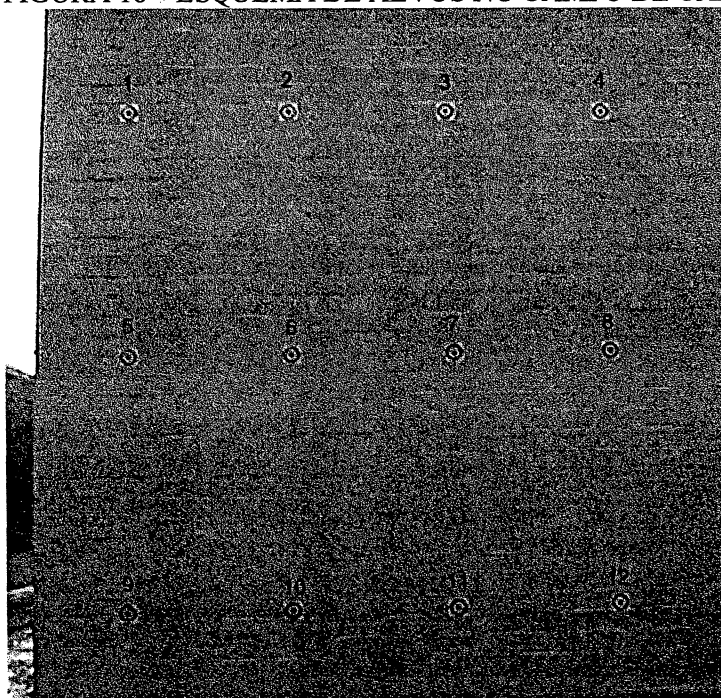
### 4.1 – CALIBRAÇÃO

Conforme visto no item 2.7, a calibração é um processo que visa a determinar os parâmetros de uma câmara que permitem restabelecer a geometria projetiva da imagem. Por se tratar de uma câmara de vídeo digital comum (não métrica), os parâmetros de calibração foram determinados, a fim de permitir o uso das equações de colinearidade.

#### 4.1.1 – Deteminação de Coordenadas do Campo de Calibração

A calibração de um equipamento deve necessariamente ter um ponto de partida, algo côm que se possa comparar resultados para ajustar parâmetros. Para tanto, as coordenadas do campo de calibração foram determinadas através de uma interseção avante. A figura 18 mostra o esquema de alvos medidos no campo de calibração.

FIGURA 18 – ESQUEMA DE ALVOS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO





A tabela 1 mostra as coordenadas obtidas através de uma interseção avante, considerando-se o erro de medição da base igual a  $\pm 5\text{mm}$  e precisão de medida angular igual a 5 segundos de arco.

Foi desenvolvido um programa em MATLAB para calcular as coordenadas dos pontos e seus desvios-padrão, dados os ângulos entre as estações, a base entre elas, e as variâncias da base e dos teodolitos utilizados, além dos ângulos medidos. O programa propaga as covariâncias, e permite ao usuário escolher um dos pontos como origem. Na tabela 1, é mostrado o ponto 10 como origem do sistema; deve ser notado que, uma vez que apresentam desvios-padrão, as coordenadas do campo de calibração não são consideradas como isentas de erros, mas seus desvios-padrão servem para calcular as injunções. Todos os pontos apresentados foram injuncionados em suas posições, permitindo-se variar livremente os parâmetros de calibração durante o ajustamento.

TABELA 1 – COORDENADAS DO CAMPO DE CALIBRAÇÃO E PRECISÕES

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)	$\sigma_x$ (m)	$\sigma_y$ (m)	$\sigma_z$ (m)
1	-1,0035	3,1522	0,0670	4,826E-04	1,385E-03	7,000E-03
2	-0,0029	3,1517	-0,0026	5,812E-04	1,384E-03	7,032E-03
3	0,9921	3,1507	-0,0662	9,956E-04	1,384E-03	7,063E-03
4	1,9904	3,1506	-0,1337	1,482E-03	1,386E-03	7,096E-03
5	-0,9891	1,5787	0,0661	4,801E-04	6,064E-04	7,000E-03
6	0,0074	1,5798	-0,0011	5,845E-04	6,077E-04	7,031E-03
7	1,0070	1,5820	-0,0705	1,003E-03	6,106E-04	7,065E-03
8	1,9876	1,5815	-0,1374	1,481E-03	6,132E-04	7,098E-03
9	-0,9931	-0,0030	0,0663	4,808E-04	4,555E-04	7,000E-03
10	0	0	0	5,821E-04	4,556E-04	7,031E-03
11	0,9973	-0,0047	-0,0677	9,980E-04	4,600E-04	7,063E-03
12	1,9946	-0,0017	-0,1364	1,485E-03	4,627E-04	7,097E-03

#### 4.1.2 – Ajustamento

Um programa desenvolvido no aplicativo MATLAB usa o método de ajustamento paramétrico com injunções para calcular os parâmetros necessários.

As dimensões das matrizes obtidas foram as seguintes

$${}_{110}X_1 = -\left({}_{110}A_{264}^T \cdot {}_{264}P_{264} \cdot {}_{264}A_{110}\right)^{-1} \cdot {}_{110}A_{264}^T \cdot {}_{264}P_{264} \cdot {}_{264}L_1 \quad (37)$$

A variância da observação de peso unitário *a posteriori* encontrada foi de 1,0069. Com 190 graus de liberdade, o valor de qui-quadrado calculado foi 191,3156. Para o nível de significância de 5%, tem-se  $\chi^2_{3;0,025} = 159,1125$  e  $\chi^2_{3;0,975} = 223,1602$ . O ajustamento foi aprovado pelo teste de qui-quadrado. Foi realizado teste de qui-quadrado para o nível de significância de 10%, sendo o ajustamento novamente aprovado.

O resíduo médio das observações encontrado foi 1,84 $\mu\text{m}$ , considerando-se os valores absolutos (em módulo) dos resíduos. Caso se deseje considerar os valores relativos dos resíduos, o valor médio será de  $1,98 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}$ , o que demonstra que os erros tendem a se anular, pois têm uma distribuição normal.

A tabela 2 mostra as coordenadas do campo de calibração ajustadas (injunctionadas), com seus respectivos desvios-padrão.

TABELA 2 – COORDENADAS DO CAMPO DE CALIBRAÇÃO AJUSTADAS

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)	$\sigma_x$ (m)	$\sigma_y$ (m)	$\sigma_z$ (m)
1	-1,0033	3,1501	0,0673	4,616E-04	1,051E-03	4,455E-03
2	-0,0025	3,1515	-0,0031	5,311E-04	9,996E-04	3,686E-03
3	0,9914	3,1510	-0,0675	7,889E-04	9,897E-04	3,686E-03
4	1,9903	3,1517	-0,1342	1,053E-03	1,050E-03	4,464E-03
5	-0,9895	1,5786	0,0669	4,562E-04	5,410E-04	3,728E-03
6	0,0074	1,5800	-0,0046	5,314E-04	5,278E-04	2,855E-03
7	1,0068	1,5824	-0,0675	7,999E-04	5,298E-04	2,864E-03
8	1,9883	1,5818	-0,1351	1,009E-03	5,479E-04	3,782E-03
9	-0,9929	-0,0030	0,0649	4,600E-04	4,274E-04	4,466E-03
10	0,0002	0,0001	0,0013	5,323E-04	4,239E-04	3,697E-03
11	0,9968	-0,0047	-0,0694	7,986E-04	4,258E-04	3,702E-03
12	1,9936	-0,0022	-0,1352	1,081E-03	4,359E-04	4,471E-03

A tabela 3 mostra a diferença entre coordenadas do campo de calibração medidas e ajustadas.

TABELA 3 – DIFERENÇAS ENTRE COORDENADAS MEDIDAS/AJUSTADAS

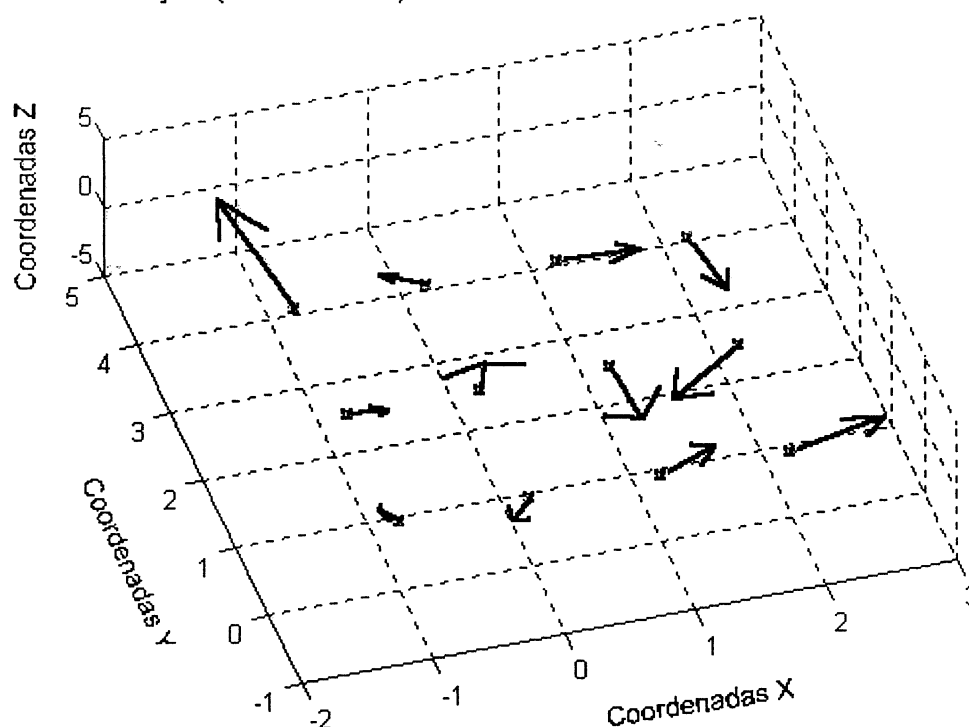
Ponto	$\Delta X$ (m)	$\Delta Y$ (m)	$\Delta Z$ (m)
1	-0,0002	0,0021	-0,0003
2	-0,0004	0,0002	0,0005
3	0,0007	-0,0003	0,0013
4	0,0001	-0,0011	0,0005
5	0,0004	0,0001	-0,0008
6	0,0000	-0,0002	0,0035
7	0,0002	-0,0004	-0,0030
8	-0,0007	-0,0003	-0,0023
9	-0,0002	0,0000	0,0014
10	-0,0002	-0,0001	-0,0013
11	0,0005	0,0000	0,0017
12	0,0010	0,0005	-0,0012
Erro Médio Quadrático (metros)			
	$m_x$	$m_y$	$m_z$
	$\pm 0,00049$	$\pm 0,00076$	$\pm 0,00185$

Verifica-se que os erros médios quadráticos dos valores ajustados, em relação aos valores medidos, são, no máximo, menores que 2mm, o que foi considerado bastante satisfatório. Uma vez que a intenção é calibrar a câmara, não há pontos de verificação, pois todas as marcas do campo de calibração foram injuncionadas. No ajustamento, apenas os parâmetros de calibração e de orientação exterior das imagens foram deixados livres para variar.

A figura 19 mostra uma representação vetorial das diferenças entre coordenadas medidas e ajustadas. Verifica-se que não existe um padrão, nem nas intensidades, nem nas direções dos vetores; sendo uma variação aleatória, indica minimização ou mesmo eliminação de erros sistemáticos.

FIGURA 19 – REPRESENTAÇÃO VETORIAL DAS DIFERENÇAS ENTRE COORDENADAS MEDIDAS E AJUSTADAS

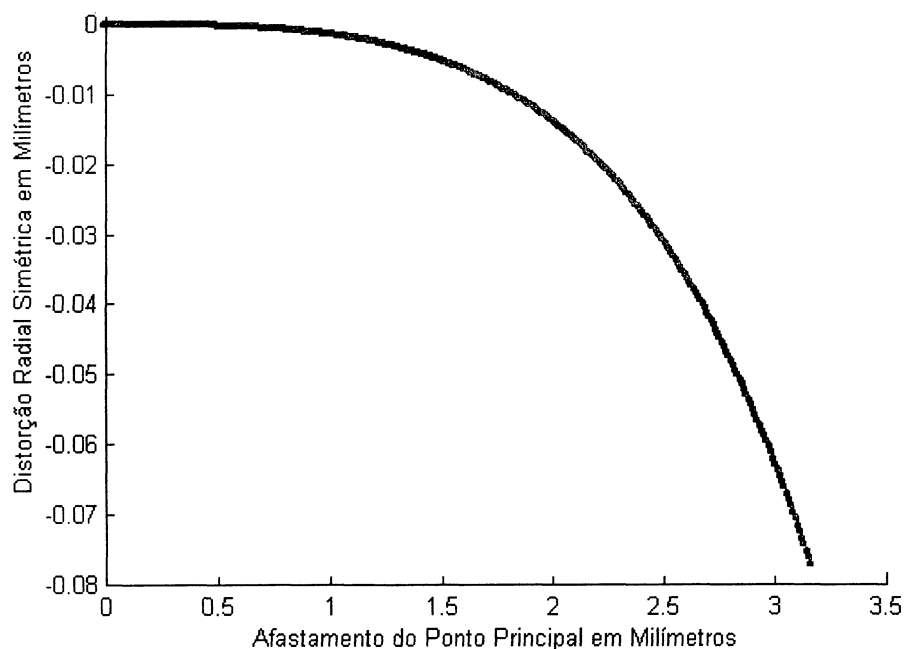
DIFERENÇAS (EXAGERADAS) ENTRE COORDENADAS MEDIDAS E AJUSTADAS



#### 4.1.3 – Distorção Radial Simétrica

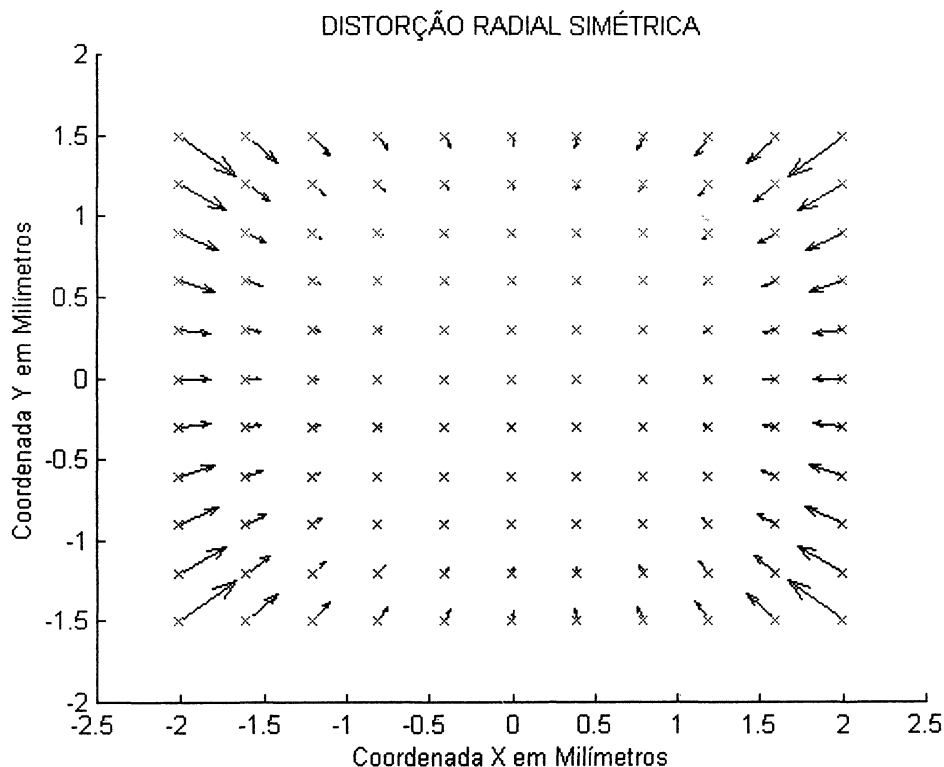
Observa-se na figura 20 que a distorção radial simétrica aumenta de acordo com o afastamento do ponto principal, comportamento esperado e comum dessa distorção.

FIGURA 20 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA  
DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA



Entretanto, o gráfico mostra que, nos pontos de máxima distorção, tem-se valores de distorção radial de cerca de 0,08mm. Como o tamanho do pixel na matriz de sensores (considerada a imagem capturada) é de cerca de  $8\mu\text{m}$ , não compensar a distorção radial simétrica poderia causar erros da ordem de 10 pixels, ou seja, aproximadamente 35m de erro no terreno, tornando inviável o uso da câmara não-métrica para uso videogramétrico.

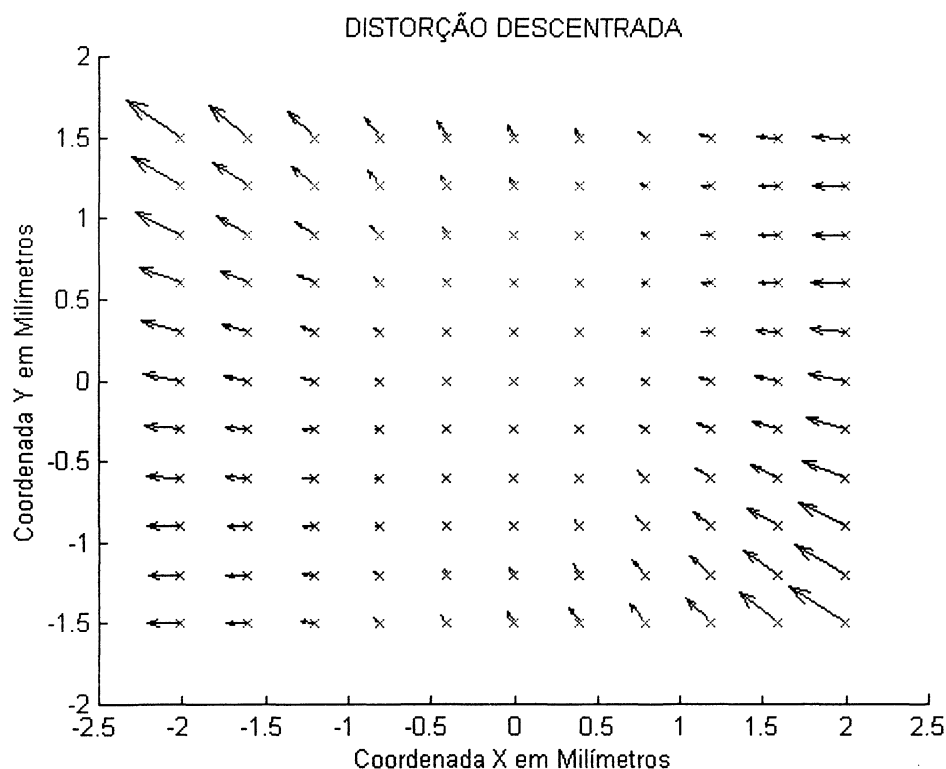
FIGURA 21 – REPRESENTAÇÃO VETORIAL DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA



Na figura 21 se pode verificar um comportamento ligeiramente diferente do observado em câmaras métricas. O gráfico mostra que existe uma maior distorção ao longo das coordenadas  $Y$ , nos extremos da imagem, em comparação com o eixo  $X$ . Isso é explicável através do formato retangular da matriz de sensores. Assim, os eixos  $Y$  extremos estão mais afastados do ponto principal que seus ortogonais e, por isso, apresentam maior distorção.

A figura 22 mostra o comportamento da distorção descentrada, e nela também se podem ver pontos de máxima distorção, semelhantes aos criados pela distorção radial simétrica, apenas com disposição diferente. Aqui também erros de cerca de 35m no terreno podem ser esperados, caso não se compense a distorção descentrada.

FIGURA 22 – REPRESENTAÇÃO VETORIAL DA DISTORÇÃO DESCENTRADA

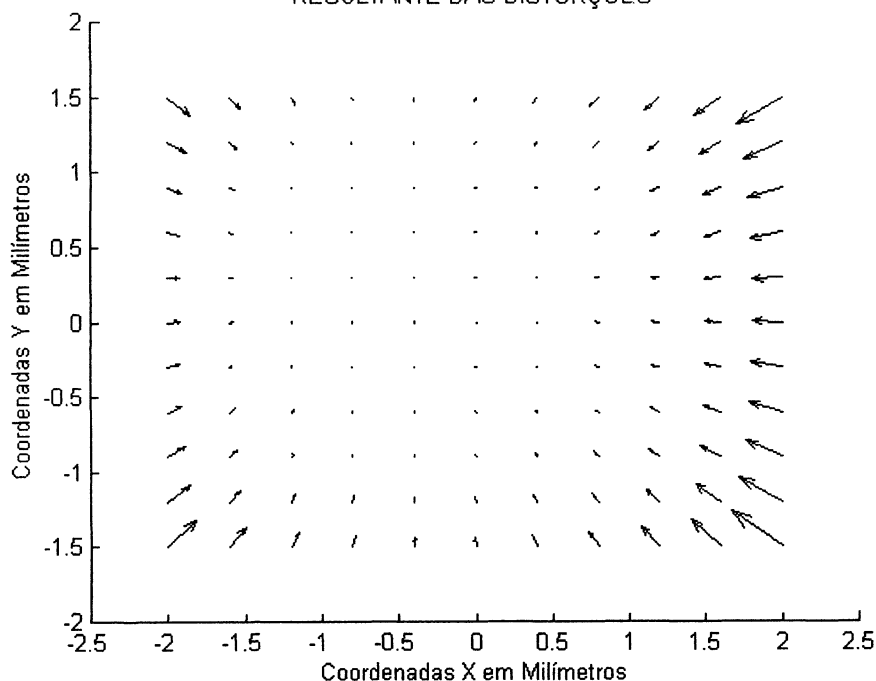


A figura 23 mostra uma distorção resultante da soma das distorções radial simétrica e descentrada, para o caso em estudo. Observa-se que há uma área de pequena distorção concentrada em coordenadas contidas na região centro-esquerda superior. O que ocorre é, à direita do gráfico, as distorções se somam, por terem o mesmo sentido, enquanto que à esquerda do gráfico, são elas opostas entre si e por isso se diminuem, levando a área de menor distorção do centro para a região centro-esquerda superior.

Isto vem confirmar que os valores de  $x_0$  e  $y_0$  mostrados na tabela 2 são próximos da realidade. Com um valor de  $x_0$  negativo e um valor de  $y_0$  positivo, tem-se o centro de projeção deslocado para a região centro-esquerda superior do referencial fiducial, ou seja, da imagem capturada, que está eivada de erros sistemáticos. Assim, verifica-se que a área central da imagem está deslocada para a região supracitada. Isso não quer dizer que as distorções não possam ser consideradas como sendo radiais e simétricas; apenas confirma

o deslocamento do ponto principal, de acordo com as coordenadas obtidas para  $x_0$  e  $y_0$  mostradas na tabela 4.

FIGURA 23 – REPRESENTAÇÃO VETORIAL DA RESULTANTE DAS DISTORÇÕES



Desta forma, caso não se deseje compensar as distorções, pode-se usar a região centro-esquerda superior, cuja influência daquelas sobre a imagem é muito menor, se comparado aos limites desta.

TABELA 4 – PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DETERMINADOS

	Valor ajustado	Desvio-padrão
$x_0$	-0,24179mm	0,030426mm
$y_0$	0,083022mm	0,026785mm
$c$	6,8254mm	0,025885mm
$K_1$	$-1,2106 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-2}$	$6,3887 \cdot 10^{-4}$
$K_2$	$-1,2034 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^{-4}$	$9,1913 \cdot 10^{-5}$
$P_1$	$-5,1341 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^{-2}$	$1,6573 \cdot 10^{-4}$
$P_2$	$2,904 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^{-2}$	$1,6565 \cdot 10^{-4}$
$A$	$7,3281 \cdot 10^{-2}$	$5,4573 \cdot 10^{-4}$



Na tabela 4 verifica-se a ausência dos parâmetros  $K_3$  e  $B$ , respectivamente um dos coeficientes da distorção radial simétrica e escala e não ortogonalidade dos eixos (do referencial fiducial). Tais itens não são aqui apresentados pois após o ajustamento do modelo apresentado no subitem 3.2.1.1, os parâmetros  $K_3$  e  $B$  mostraram-se não significativos, ou seja, seus desvios-padrão foram maiores que seus valores ajustados. Portanto, eles foram retirados do modelo e o ajustamento foi recalculado, resultando nos valores e desvios-padrão acima apresentados.

A razão do parâmetro  $K_3$  ser não significativo é que a função que modela a distorção radial simétrica é um polinômio, e  $K_3$  é o coeficiente que modela as mais altas frequências, ou seja, as menores variações da distorção. Se essas menores variações são desprezíveis, é normal que seus valores ajustados sejam menores que seus desvios-padrão.

Para o caso do parâmetro  $B$ , pode-se raciocinar que o dispositivo de captura da imagem transforma os pixels retangulares em quadrados, ao transformar o padrão da câmara de 720 x 500 para 640 x 480 (colunas x linhas). O dispositivo de captura elimina o erro de ortogonalidade entre os eixos ao inserir a imagem numa matriz virtual de níveis de cinza que, por ser um elemento não físico, não possui erros de ortogonalidade.

Outrossim, resta apenas o erro de escala no eixo de referência, por causa da transformação geométrica dos pixels — de retangulares para quadrados —, a fim de formar a nova imagem capturada. O dispositivo de captura recebe o formato 720 colunas por 500 linhas, mas transforma-o em 640 colunas por 480 linhas, interpolando os valores e causando uma leve degradação na resolução espacial da imagem. Esta degradação se traduz no erro de escala no eixo de referência. Na verdade, ao interpolar os valores dos níveis de cinza, o dispositivo de captura também causa uma degradação na imagem. Tal não foi considerado como perda de informação neste trabalho.

## 4.2 – AEROTRIANGULAÇÃO

Para gerar ortofotos são necessários os parâmetros de orientação exterior das imagens as quais se deseja ortorectificar. Tais parâmetros foram obtidos por aerotriangulação, usando-se vinte e três pontos, dos quais dezesseis foram aerotriangulados; apenas sete foram injuncionados. Na verdade, todos os pontos poderiam ter sido injuncionados, em virtude de serem conhecidas suas coordenadas, mas preferiu-se considerar uma situação mais próxima da realidade. Poder-se-ia ter usado uma resseção espacial para cada imagem de vídeo, o que tornaria ainda mais fácil o trabalho, apesar de repetitivo. Escolheu-se a aerotriangulação de uma faixa (*bundle adjustment* – ajustamento em bloco) por ela prover uma homogeneização de resultados. A tabela 5 mostra os parâmetros de orientação exterior de cada foto, além de seus respectivos desvios-padrão.

TABELA 5 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR

IMAGEM 1		IMAGEM 2		IMAGEM 3	
Parâmetros	$\sigma$	Parâmetros	$\sigma$	Parâmetros	$\sigma$
-79,446°	0,325°	-78,568°	0,214°	-78,309°	0,223°
2,401°	2,604°	5,015°	1,603°	3,427°	1,269°
0,240°	3,415°	-4,653°	1,009°	-3,884°	1,225°
395529,170m	150,343m	395595,360m	90,799m	395554,800	71,20m
6447499,000m	194,793m	6447039,800m	58,683m	6446317,000	67,90m
3225,007m	33,112m	3161,838m	18,082m	3143,923	26,62m
IMAGEM 4		IMAGEM 5		IMAGEM 6	
Parâmetros	$\sigma$	Parâmetros	$\sigma$	Parâmetros	$\sigma$
-77,029°	0,361°	-76,878°	0,203°	-76,510°	0,372°
2,378°	2,983°	2,603°	1,258°	3,919°	2,493°
-6,841°	2,190°	-4,266°	1,082°	-5,364°	3,154°
395395,360m	165,53m	395434,960m	70,67m	395482,390m	139,96m
6445496,100m	117,70m	6444609,900m	61,51m	6443940,700m	174,86m
3135,744m	32,25m	3149,519m	16,25m	3111,526m	24,43m

Poder-se-ia dizer que os desvios-padrão das coordenadas dos pontos principais das imagens ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) e dos ângulos ( $\kappa, \phi, \omega$ ) são muito altos, e que isso traria problemas à geração de ortofotos, pois os erros seriam muito grandes, mas isso não é verdade. Os erros

encontrados não causam prejuízo às coordenadas aerotrianguladas no terreno, e tal é explicável.

Conforme dito no subitem 3.3.1, a escala considerada foi de 1:446.860, enquanto que a escala normal da imagem num aerolevanteamento é, em geral, 1:20.000. Caso se quisesse considerar um fator de relação entre as escalas, seria o da divisão por aproximadamente quarenta, ou seja, a escala de 1:20.000 dividida por quarenta seria semelhante à escala da imagem de vídeo. Se a escala da imagem de vídeo é mais que quarenta vezes menor que a escala normal de um aerolevanteamento, é de se considerar que os desvios-padrão sejam também muito maiores, pois qualquer movimento da câmara afetará em muito os parâmetros de orientação exterior. Para se verificar tal assertiva, mudou-se o sistema de coordenadas do terreno de UTM híbrido (coordenadas planimétricas UTM com altimetria) para um sistema cartesiano geodésico local, cujas coordenadas não têm valor tão grande quanto as do sistema UTM híbrido. A disparidade entre valores — neste caso — dos referenciais fotogramétrico e de terreno influi para aumentar os valores dos desvios-padrão. Contudo, os desvios-padrão foram aproximadamente os mesmos que para as coordenadas *N* e *E*, variando no máximo cerca de três metros. Já para os desvios-padrão das coordenadas *Z* não houve variação.

Assim, considerando-se um erro — considerado como dentro dos padrões — de cerca de três metros para as coordenadas do ponto principal, para um aerolevanteamento na escala de 1:20.000, o mesmo erro na escala da imagem de vídeo seria quarenta vezes maior, ou seja, cento e vinte metros, admitindo-se que se possa dar um tratamento proporcional. Mesmo assim, a qualidade do ajustamento pode ser observada também através dos desvios-padrão das coordenadas obtidas, bem como pela comparação destas com as coordenadas dos pontos no terreno.

Outro fato que corrobora a relação entre erros e escala é que o programa usado para aerotriangulação é quase o mesmo que o programa de calibração. A única diferença é que o primeiro ajusta não somente os valores dos parâmetros de orientação exterior e das coordenadas dos pontos — permitindo injunções —, mas também ajusta os valores dos

parâmetros de distorções das câmaras (ver subitens 2.7 e 3.2). Pode-se ver que, para o caso de uma escala muito menor, os erros também são muito menores.

A tabela 6 mostra as coordenadas  $E$ ,  $N$  e  $Z$  (planialtimétricas) aerotrianguladas e seus desvios-padrão.

TABELA 6 – COORDENADAS AEROTRIANGULADAS

Ponto	E (m)	N (m)	Z (m)	$\sigma_E$	$\sigma_N$	$\sigma_Z$	Injuncionado
1	395758,970	6447568,800	4,098	0,042	0,042	0,029	Sim
2	395277,060	6447635,500	27,422	8,236	13,619	78,239	Não
3	394505,210	6447344,700	4,810	0,009	0,009	0,012	Sim
4	395341,200	6447308,000	33,308	7,089	7,743	78,975	Não
5	395899,780	6446767,500	23,308	10,395	6,158	63,947	Não
6	395154,820	6446851,700	44,298	7,182	5,522	49,082	Não
7	394902,370	6446622,600	-0,215	10,063	6,662	55,185	Não
8	395766,440	6446327,500	64,902	10,719	10,626	76,249	Não
9	395171,420	6446381,700	54,745	8,366	9,323	66,602	Não
10	395146,140	6445817,100	5,638	0,001	0,001	0,002	Sim
11	394813,370	6445580,700	-54,322	7,835	8,694	34,691	Não
12	395927,840	6445245,700	3,203	0,005	0,005	0,018	Sim
13	395628,310	6445245,800	-12,375	6,113	5,488	42,085	Não
14	394949,300	6445036,500	4,102	0,210	0,210	0,113	Sim
15	394482,580	6444641,400	20,772	17,418	9,372	56,018	Não
16	395723,960	6444508,100	-13,382	6,117	6,252	45,158	Não
17	395173,130	6444539,200	-11,143	5,788	5,761	36,636	Não
18	394608,570	6444144,000	32,360	12,180	8,689	47,453	Não
19	395682,050	6443911,100	9,913	7,194	10,356	49,495	Não
20	395319,640	6443655,000	30,828	5,903	13,346	47,901	Não
21	394522,160	6443797,500	35,446	16,494	13,911	57,633	Não
22	395877,020	6443623,000	4,006	0,451	0,451	0,452	Sim
23	394833,030	6443507,000	2,994	0,451	0,452	0,452	Sim

Não se podem comparar resultados com os obtidos por câmaras métricas, mas os que foram alcançados são promissores, tendo-se em mente que foi utilizada uma câmara de vídeo comum, num suporte de fortuna, calibrada para uso terrestre, considerando-se — por simplificação — que as coordenadas do ponto principal não variam (ver GALO et al, 2000). Entretanto, verifica-se que, para coordenadas altimétricas, o método ainda não oferece precisão satisfatória.

Os erros médios quadráticos calculados para as observações videogramétricas segundo a equação (29) ficaram abaixo do valor de um pixel, ou seja,  $m_x = 6,6572\mu\text{m}$  e  $m_y = 6,5306\mu\text{m}$ , e foram considerados satisfatórios. O número de graus de liberdade para o ajustamento com as presentes injunções é 26, e ele foi testado para os percentis de distribuição qui-quadrado, em níveis de significância de 5% e 10%, sendo aprovado.

A tabela 7 mostra as diferenças entre as coordenadas do terreno e as aerotrianguladas.

TABELA 7 – DIFERENÇAS ENTRE COORDENADAS DE TERRENO E AEROTRIANGULADAS

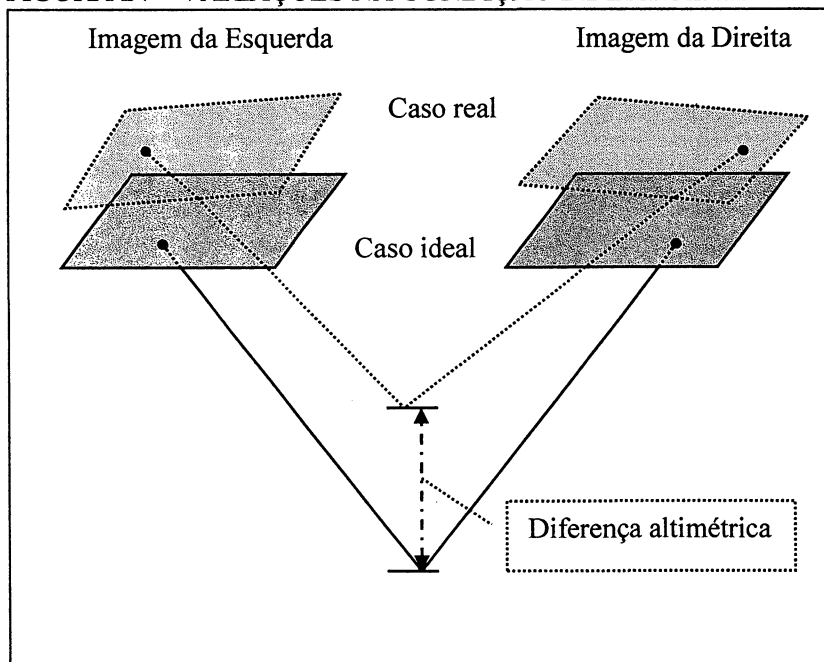
Coordenadas N (m)			Coordenadas E (m)			Coordenadas Z (m)		
Terreno	Aerot.	$\Delta_E$ (m)	Terreno	Aerot.	$\Delta_E$ (m)	Terreno	Aerot.	$\Delta_Z$ (m)
395758,975	395758,970	0,005	6447568,81	6447568,800	0,011	4,098	4,098	0,000
395300	395277,060	22,940	6447654	6447635,500	18,500	4	27,422	-23,422
394505,208	394505,210	-0,002	6447344,67	6447344,700	-0,027	4,8095	4,810	0,000
395349	395341,200	7,800	6447316	6447308,000	8,000	3,473	33,308	-29,835
395912	395899,780	12,220	6446764	6446767,500	-3,500	4	23,308	-19,308
395156	395154,820	1,180	6446862	6446851,700	10,300	4	44,298	-40,298
394902	394902,370	-0,370	6446625	6446622,600	2,400	4	-0,215	4,215
395782	395766,440	15,560	6446313	6446327,500	-14,500	4	64,902	-60,902
395183	395171,420	11,580	6446384	6446381,700	2,300	4	54,745	-50,745
395146,138	395146,140	-0,002	6445817,14	6445817,100	0,038	5,638	5,638	0,000
394812	394813,370	-1,370	6445578	6445580,700	-2,700	3,452	-54,322	57,774
395927,842	395927,840	0,002	6445245,75	6445245,700	0,048	3,2034	3,203	0,000
395633	395628,310	5,690	6445234	6445245,800	-11,800	4	-12,375	16,375
394949,317	394949,300	0,017	6445036,43	6445036,500	-0,069	4,1031	4,102	0,001
394461	394482,580	-21,580	6444636	6444641,400	-5,400	3	20,772	-17,772
395729	395723,960	5,040	6444490	6444508,100	-18,100	3	-13,382	16,382
395174	395173,130	0,870	6444523	6444539,200	-16,200	3	-11,143	14,143
394599,782	394608,570	-8,788	6444127,83	6444144,000	-16,171	4,9543	32,360	-27,406
395693,63	395682,050	11,580	6443904,26	6443911,100	-6,840	4	9,913	-5,913
395327,037	395319,640	7,397	6443640,91	6443655,000	-14,095	3,964	30,828	-26,864
394544	394522,160	21,840	6443774	6443797,500	-23,500	4	35,446	-31,446
395877	395877,020	-0,020	6443623	6443623,000	0,000	4	4,006	-0,006
394833	394833,030	-0,030	6443507	6443507,000	0,000	3	2,994	0,006

As células hachuradas são as diferenças altimétricas entre coordenadas do terreno e aerotrianguladas, em pontos não injuncionados. A variação em altimetria é muito maior que em valores planimétricos, e isso se dá pela escala da imagem. Enquanto que em

câmaras métricas a distância focal é de cerca de 150mm, para o equipamento utilizado, a mesma distância tem valor de aproximadamente 6,83mm. Considerando-se que a escala é igual à distância focal dividida pela altura de vôo — no caso, 3.050m —, para uma câmara métrica a escala seria igual a 1:20.300 (valor arredondado), enquanto que para a câmara de vídeo utilizada seria igual a 1:446.500 (também arredondado). Isso significa dizer que, para qualquer variação do equipamento, grandes variações serão introduzidas nas coordenadas fotogramétricas. Como o ajustamento de coordenadas aerotrianguladas depende da condição de epipolaridade, variações na atitude da câmara causam diferenças na planimetria aerotriangulada, mas causam diferenças muito maiores na altimetria, pois o ângulo entre os raios luminosos correspondentes sofrerá grandes variações.

A figura 24 ilustra este processo de maneira simplificada, mostrando que as diferenças planimétricas são pequenas, em relação às diferenças altimétricas.

FIGURA 24 – VARIAÇÕES NA CONDIÇÃO DE EPIPOLARIDADE.



### 4.3 – GERAÇÃO DE ORTOFOTOS

É possível verificar na figura 25 as alterações antes e depois da correção atmosférica. A figura da esquerda contém espalhamento, e não é uma ortoimagem, mas apenas a imagem de vídeo digital capturada da câmara de vídeo, rotacionada para facilitar a comparação com a imagem da direita. Ao se comparar com a imagem da direita, pode-se notar não somente as diferenças geométricas, mas também as radiométricas. A imagem da direita foi corrigida do espalhamento atmosférico e, de posse dos seus parâmetros de orientação exterior, bem como dos parâmetros de calibração da câmara, foi possível ortoretificá-la. Portanto, podem ser observadas as diferenças entre a imagem inicial, sem correção alguma, e a ortoimagem.

FIGURA 25 – IMAGEM SEM CORREÇÃO E ORTOIMAGEM

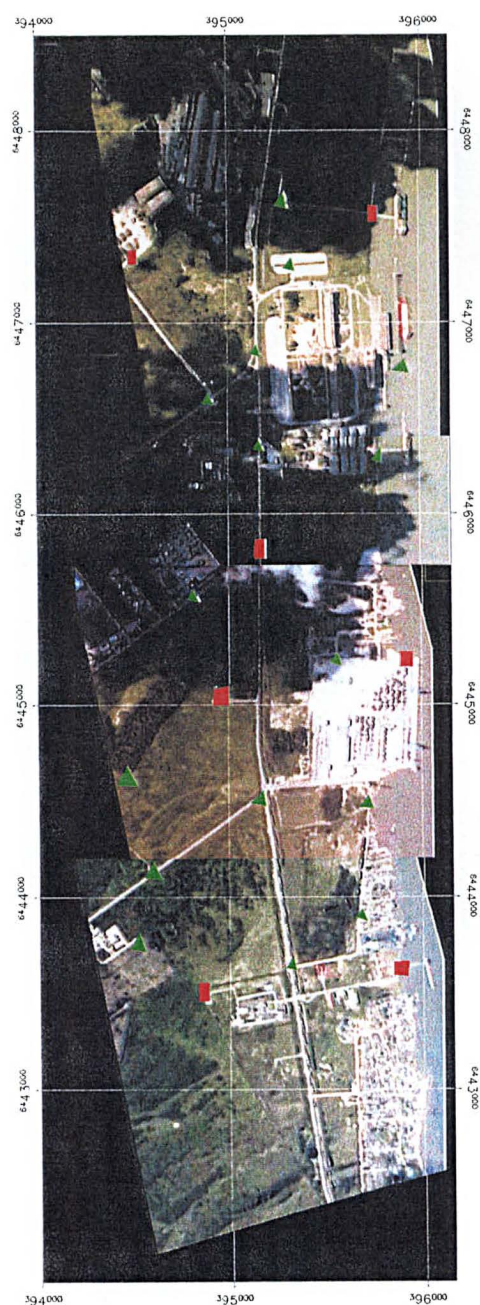


A figura 26 mostra o ortomosaico obtido através da mosaicagem de quatro ortofotos, com um grid de coordenadas UTM. Os quadrados vermelhos mostram os pontos utilizados como apoio, que foram injuncionados. Os triângulos verdes mostram os pontos que foram utilizados como coordenadas aproximadas, ou seja, que não foram



injunctionados. Como se possuíam as coordenadas de todos os pontos utilizados, os pontos marcados como triângulos verdes serviram como pontos de verificação. As coordenadas foram determinadas de acordo com o subitem 3.4.

FIGURA 26 – ORTOMOSAICO OBTIDO





As ortoimagens foram geradas de acordo com o item 3.5.1, mas não foi necessário gerar seis ortoimagens, referentes às seis imagens digitais iniciais. Como a intenção inicial era fazer um ortomosaico, geraram-se apenas quatro ortoimagens. Como a área de sombra era diferente em cada ortoimagem, foi necessário efetuar a correção do espalhamento atmosférico de maneira diferente para cada uma. Após isso, o contraste, o brilho, a matiz e a saturação foram alterados, a fim de melhorar a visualização e evitar diferenças de tonalidade muito grandes entre as ortoimagens.

O ortomosaico foi feito usando-se o programa ENVI, através da opção de mosaicagem de imagens georreferenciadas, conforme descrito no subitem 3.6. Não é realizada rotação ou alteração de escala, visto que as ortoimagens estão todas no mesmo referencial e têm igual escala.

#### 4.3.1 – Verificação da Acurácia Planimétrica

Para se ter idéia da qualidade do produto gerado, é necessária uma base ou referência. Neste caso, como se possuem as coordenadas dos pontos, pode-se realizar uma comparação por toda a área da ortoimagem, e verificar a qualidade de sua geração. A tabela 8 mostra a comparação entre as coordenadas planimétricas do terreno e as medidas na ortoimagem.

O maior interesse na carta náutica é dado às informações que possam influir na segurança da navegação. Por este motivo, apresenta-se uma tabela de comparação apenas com as coordenadas planimétricas. Informações de altimetria nem sempre são interessantes ao navegante; o que mais lhe interessa são a batimetria, a sinalização náutica, e pontos de apoio à navegação.

Foram retiradas as linhas correspondentes aos pontos 02, 09, 13, 19 e 21, que são as coordenadas retiradas da imagem SPOT da área, registrada, com erro médio de doze metros. Estas coordenadas serviram apenas como parâmetros iniciais do ajustamento, e não se adequam para uma verificação de acurácia, pois o erro é muito superior ao desejado.

TABELA 8 – COMPARAÇÃO ENTRE COORDENADAS DO TERRENO E DO ORTOMOSAICO

Ponto	Coordenadas E (metros)			Coordenadas N (metros)		
	terreno	imagem	$\Delta_E$	terreno	imagem	$\Delta_N$
1	395758,975	395754,2	4,775	6447568,811	6447565,43	3,381
3	394505,208	394504,2	1,008	6447344,673	6447344,91	-0,237
4	395349	395341,04	7,96	6447316	6447309,91	6,09
5	395912	395911,76	0,24	6446764	6446770,97	-6,97
6	395156	395155,46	0,54	6446862	6446854,87	7,13
7	394902	394906,86	-4,86	6446625	6446613,35	11,65
8	395782	395778,71	3,29	6446313	6446315,83	-2,83
10	395146,138	395151,96	-5,822	6445817,138	6445804,79	12,348
11	394812	394815,83	-3,83	6445578	6445587,78	-9,78
12	395927,842	395929,27	-1,428	6445245,748	6445241,25	4,498
14	394949,317	394948,88	0,437	6445036,431	6445038,23	-1,799
15	394461	394469,19	-8,19	6444636	6444628,7	7,3
16	395729	395722,69	6,31	6444490	6444502,69	-12,69
17	395174	395179,97	-5,97	6444523	6444523,69	-0,69
18	394599,782	394598,74	1,042	6444127,829	6444135,16	-7,331
20	395327,037	395327,03	0,007	6443640,905	6443648,63	-7,725
22	395877	395876,75	0,25	6443623	6443624,12	-1,12
23	394833	394836,83	-3,83	6443507	6443505,11	1,89

- Valor médio de  $\Delta_E$ : -0,448m.
- Valor médio de  $\Delta_N$ : 0,173m.

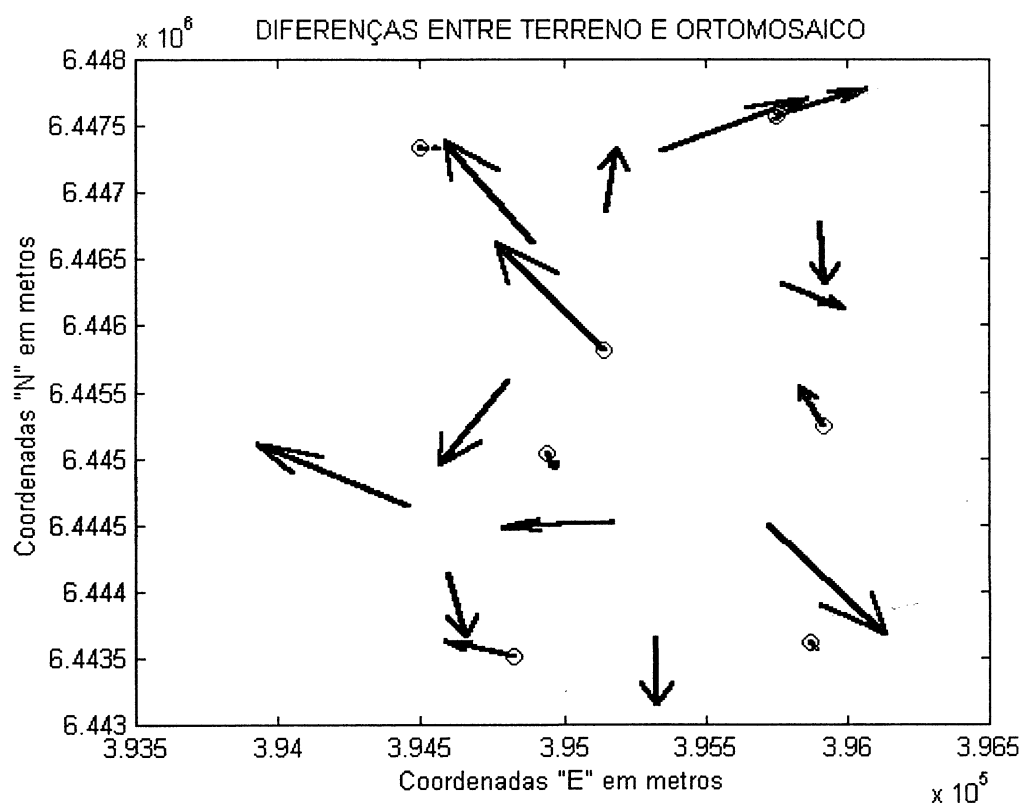
Apesar dos valores médios terem sido baixos, isso não influi muito num processo de verificação da qualidade da imagem, pois os erros não sistemáticos têm tendência a uma distribuição normal, ou seja, têm simetria (tendem a se anular). Neste caso, é melhor usar o erro médio quadrático, que permite ter idéia do erro global do ortomosaico. Outro ponto a ser levado em consideração é o erro das coordenadas retiradas da imagem SPOT, cujo valor mínimo é de dez metros, podendo variar até trinta metros.

Usando a equação contida em (29), admitindo como resíduos a diferenças, tem-se que os erros médios quadráticos das coordenadas  $E$  e  $N$  são iguais a:

- $m_E = \pm 4,413\text{m}$ ; e
- $m_N = \pm 7,261\text{m}$ .

A figura 27 mostra a representação vetorial (exagerada) das diferenças planimétricas encontradas. Os vetores que apresentam um círculo vermelho são os pontos que foram injuncionados.

FIGURA 27 – REPRESENTAÇÃO VETORIAL DAS DIFERENÇAS PLANIMÉTRICAS



Observa-se que não existe um padrão, indicando não haver erros de natureza sistemática. Outra forma de verificação é a visual. Como foi feito um ortomosaico, pode-se verificar visualmente a qualidade da sua geração. Para tal, usam-se feições retilíneas (como estradas) que seja perpendiculares a uma fronteira do mosaico, e que continuem de uma imagem para outra. A existência de serrilhamento na imagem mostra que ela pode não ter sido bem mosaicada. Numa avenida que corta o ortomosaico de um lado a outro, no sentido norte-sul, notam-se alguns efeitos de serrilhamento. Ao se medir

este efeito, o erro máximo observado é de 3 pixels na direção *E* e dois pixels na direção *N*, ou seja, 10,5m e 7m, respectivamente.

#### 4.3.2 – Fusão do Ortomosaico com a Imagem SPOT

O resultado da fusão não apresenta boa qualidade, devido à diferença temporal entre as duas imagens. A imagem SPOT foi obtida em 1999, muito antes do vôo videogramétrico, e neste intervalo ocorreram alterações significativas na linha de costa. Como por exemplo — somente na área de estudo — pode-se citar o aumento do antigo terminal de carne, hoje transformado num terminal de contêineres, marcado na figura 28 como ponto “A”.

A fusão do ortomosaico obtido com a imagem SPOT não melhorou sua resolução espacial, como era de se esperar, mas apresentou melhorias para diferenciação entre terra e água, em locais de sombra. Não obstante, caso se desejasse utilizar a imagem SPOT como referência para detecção da fronteira terra-água, não se teria sucesso, pois a área de estudo possui muitas partículas em suspensão, aumentando a resposta espectral da água no modo pancromático. Além disso, os sensores da banda pancromática SPOT não produzem uma resposta mais próxima do infravermelho, o que permitiria maior distanciamento entre as respostas espectrais da água e da terra.

Neste trabalho, não se pode utilizar a imagem SPOT como padrão, pois ela foi redimensionada e reamostrada para ter número de pixels compatível com o ortomosaico, o que resultou numa perda ainda maior de resolução espacial da imagem do satélite. A figura 28 mostra o resultado da fusão do ortomosaico com a imagem HRV-pancromática.

FIGURA 28 – IMAGEM RESULTANTE DA FUSÃO ORTOMOSAICO/SPOT



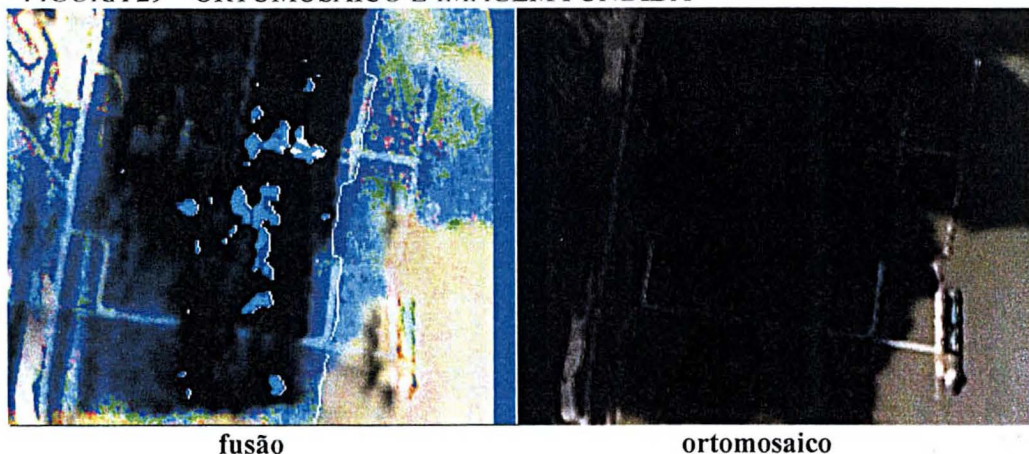
Observa-se que em boa parte da figura 28 aparecem tons azulados. Eles foram causados pelas sombras que aparecem na figura 26; quando foram fundidas, as sombras causaram essa aberração cromática, mesmo tendo sido compensado o espalhamento atmosférico no ortomosaico. As sombras causam uma grande queda de valor da intensidade, ao mesmo tempo em que diminuem a saturação das regiões por elas cobertas.

A imagem SPOT não contém sombras, e já foi adquirida com as correções atmosféricas e geométricas (não georreferenciada). Ao ser fundida com o ortomosaico, onde havia sombras, surgiram níveis de cinza normais, não escurecidos. Como o espalhamento não é absolutamente compensado apenas se deslocando o histograma para a esquerda — diminuindo de todos os níveis de cinza da imagem um possível valor de espalhamento —, ao ser fundida a imagem, os novos níveis de cinza exacerbaram o pouco espalhamento que restava na imagem. Como o espalhamento afeta os menores comprimentos de onda, o azul (banda de menor comprimento de onda do visível) foi o tom dominante onde deveriam aparecer sombras.

Mas existe ainda a questão da melhoria da diferenciação, em especial onde havia sombras no ortomosaico. Na figura 29 podem ser observadas duas porções de terra iguais. O leitor verá a imagem da esquerda, resultado da fusão SPOT-ortomosaico, e a imagem da direita, o ortomosaico puro.

Visualmente, a imagem fundida não parece ser aproveitável, mas ao compará-la com a imagem da direita, ver-se-á que o ortomosaico não mostra claramente a linha de costa; a figura da esquerda a mostra sem dificuldades, apesar de não definir claramente as construções que avançam sobre o mar, claramente visíveis no ortomosaico. Foi desenhada uma linha branca sobre a linha de costa, para facilitar o reconhecimento do contorno.

FIGURA 29 – ORTOMOSAICO E IMAGEM FUNDIDA





Portanto, verifica-se que, apesar da imagem SPOT não trazer melhorias à resolução espacial e nem realçar a diferenciação terra-água, ela complementa o ortomosaico, que define claramente a linha de costa e feições, exceto em áreas de sombra, onde a imagem fundida o complementa. No caso deste trabalho, a imagem SPOT veio a ser bastante útil como complementação do ortomosaico para a retirada de informações de linha de costa e edificações, porém, caso houvesse condições favoráveis para a filmagem videogramétrica, o ortomosaico seria suficiente.

Finalmente, resta saber se a imagem pancromática SPOT poderia ser utilizada como padrão para melhorar uma imagem de vídeo. No âmbito deste trabalho, não, mas isso não cria uma regra. Poder-se-ia ter utilizado a resolução de 160 x 120 pixels, o que tornaria o tamanho do pixel no terreno igual a 14m, ou seja, uma resolução espacial menor que a da imagem SPOT. Um dos motivos para se fazer isso seria a necessidade de se armazenar mais imagens em menor espaço.

Existem câmaras de vídeo de pequeno porte que podem ser calibradas e usadas como sensores aerotransportados, como as chamadas “cybercams”, ou câmaras para videoconferência. Por sua baixa resolução espacial — o tamanho do pixel chegaria a 15 ou 20 metros no terreno, pela altitude de vôo usada neste trabalho —, poderiam ser fundidas com imagens SPOT e melhoradas. Importante também seria obter imagens que não tivessem uma diferença temporal muito grande, ou seja, que não estivessem desatualizadas uma em relação à outra e vice-versa.

#### 4.3.3 – Comparação entre as Imagens Produzidas e a Carta Náutica 2101

A carta náutica 2101 da DHN abrange o porto da cidade de Rio Grande (RS), desde a entrada, até parte da Ilha dos Marinheiros. Está na escala 1:25.000 (na latitude 32° 06' 50"S), e seu datum é Córrego Alegre, projeção de Mercator. Compreende a área entre as latitudes e as longitudes. Para comparação, foi digitalizada uma porção da costa e uma avenida principal da malha viária, entre as latitudes 32° 06' S e 32° 10' S e as longitudes

052° 06' W e 052° 10' W. Como as ortofotos e a imagem fundida estão referenciadas ao elipsóide WGS-84, as coordenadas da carta foram transformadas para este sistema.

FIGURA 30 – COMPARAÇÃO ENTRE O CONTORNO DA CARTA NÁUTICA E O ORTOMOSAICO



Vê-se na figura 30 que a linha de costa e a avenida principal da imagem não estão exatamente superpostas, e a diferença média entre o ortomosaico e a porção digitalizada



da carta é de cerca de 170m. Isso ocorre porque durante a produção da carta houve um erro de datum, comprometendo todo o produto. Uma nova edição da carta foi suspensa, e a DHN trabalha no momento numa edição corrigida, a fim de continuar a garantir a segurança da navegação. Observa-se também a diferença de forma entre o contorno digitalizado e o ortomosaico, que é muito mais atual.

Utilizou-se o programa ArcView para gerar um contorno e digitalizar algumas feições da carta náutica, a partir do ortomosaico e da imagem fundida. Na figura 31 podem-se comparar a carta náutica (digitalizada) e o resultado gerado a partir do ortomosaico. Circundados em vermelho estão pontos na carta náutica, com seus correspondentes no contorno, nos quais se observa a necessidade de uma atualização, pois estas feições visíveis no mosaico não constam do mapa.

FIGURA 31 – COMPARAÇÃO ENTRE OS CONTORNOS DA CARTA NÁUTICA E DA ORTOIMAGEM



Os três envoltórios vermelhos indicam, de cima para baixo: 1) dois terminais de cereais que não existiam; 2) a expansão do terminal de contêineres, outrora um terminal de carne; e 3) o surgimento do cais da Estação Naval do Rio Grande, da Marinha do Brasil.

O contorno gerado a partir do ortomosaico foi feito apenas para ilustrar a necessidade de uma nova edição da carta náutica do porto de Rio Grande, nº 2101. Não foi possível avaliar a qualidade das feições digitalizadas a partir do ortomosaico, uma vez que a carta náutica apresenta erros. Caso não houvesse o erro da carta náutica, poder-se-ia comparar visualmente os contornos superpondo-os.

A parte que se seguiria agora seria continuar com a editoração eletrônica do arquivo de contorno (considerando que está pronto e de acordo com as normas), adicionando a toponímia, as profundidades, a sinalização náutica e iluminações (detalhes específicos aos navegantes) relevantes, colorização, linhas isobatimétricas, e outras informações, como por exemplo: número de edição; Avisos aos Navegantes que alteram a carta; escala; ábacos; e estabelecimento do porto, entre outros.

Seriam geradas as matrizes de impressão após a conferência final e seria feita uma nova edição atualizada da carta náutica, que logo estaria disponível em todos os postos de venda do país.

## 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 – CALIBRAÇÃO

Sobre o processo de calibração, conclui-se que, mesmo sem considerar o comportamento variável das coordenadas do ponto principal  $(x_0, y_0)$ , atingiu-se um resultado bastante satisfatório, pois não são observadas tendências nas coordenadas do ajustamento.

Observa-se pelos resultados obtidos que houve uma compensação do comportamento variável das coordenadas do ponto principal, uma vez que seus desvios-padrão correspondem a cerca de 4 pixels.

### 5.2 – AEROTRIANGULAÇÃO

Observou-se que a aerotriangulação de ajustamento em bloco torna homogêneos os resultados mas, por causa da pequena escala, as variações altimétricas são muito grandes. Uma possível solução para isso seria a injunção de posição apenas em altitude ( $Z$ ), deixando livres as coordenadas planimétricas ( $N$  e  $E$ ). Tal não foi testado neste trabalho pela vontade de tornar o experimento o mais condizente possível com a realidade, ou seja, uso de injunções de posição apenas em pontos de controle planialtimétricos, e aerotriangulação nos outros pontos.

Foi observada uma diferença nas acurácias planimétrica e altimétrica, e tal se faz pela pequena escala da câmara de vídeo. As imagens possuem escala de 1:17.000, mas a câmara de vídeo, mais precisamente o *CCD*, possui uma escala de 1:446.680, para a altitude de vôo de 10.000 pés. Por isso as grandes variações nos parâmetros de orientação exterior, bem como nas coordenadas altimétricas.

### 5.3 – ORTOFOTOS

O vôo videogramétrico foi feito sob condições um pouco desfavoráveis, pois havia cobertura de nuvens em boa parte da área de estudo, prejudicando um pouco o resultado final, ou seja, a ortoimagem. Estas condições são características da área de estudo. Ainda assim, conseguiu-se retirar a informação desejada da ortoimagem: o contorno, ou seja, a linha de costa.

Os resultados apresentaram uma acurácia geral (considerando o erro médio quadrático) de cerca de quatro metros na direção *E* e sete metros na direção *N*, ou de cerca de oito metros e meio.

As câmaras de vídeo digitais que estão no mercado para o usuário comum podem apresentar trabalhos de um padrão aceitável, dependendo da escala do produto que se deseja obter. A escala do ortomosaico gerado é de 1:17.000, porém, a escala da imagem, ao se considerar a distância focal e a altitude de vôo (10.000 pés) é de 1:446.860. Sendo assim, um erro médio de dez metros — que é a resolução geométrica da imagem SPOT — é aceitável.

Ao se calcular a escala de uma possível carta a ser produzida com um erro de 8,5m, considerando-se o erro gráfico como 0,2mm, obtém-se uma escala de 1:42.500. Ao se considerar o erro de 0,3mm, obtém-se a escala aproximada de 1:28.330.

### 5.4 – INTEGRAÇÃO DE DADOS

Neste trabalho, verificou-se a viabilidade de integração de dados do sensor HRV-pancromático com imagens de vídeo produzidas por uma câmara comum, desde que sejam levados em consideração os seguintes aspectos: 1) resolução geométrica compatível; e 2) nenhuma ou pequena desatualização entre as imagens.

Com este trabalho, concretiza-se a possibilidade da Marinha do Brasil realizar atualizações de contornos de cartas náuticas por meios próprios, sem depender de

aerolevantamentos feitos por empresas especializadas. Este trabalho demonstra que a Marinha do Brasil pode atuar de maneira independente para obter os contornos das cartas náuticas, e cartas de escala maior que 1:14.200 (que precisem de imagens de maior resolução espacial) também podem ser obtidas por este método, desde que se voe a uma altitude menor.

Outrossim, a metodologia ora apresentada é válida e pode ser usada sempre que houver a necessidade de atualização, em especial de terrenos que sofram grande variações. Pode ser usada também para determinar variações em áreas cultivadas, ou mesmo como subsídio para executar ações contra desastres naturais.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, o uso de imagens de satélite para melhoria da resolução geométrica do vídeo, desde que com uma plataforma orbital cuja apresentação visual seja melhor que a da câmara digital empregada. Podem ser testadas imagens obtidas de satélites como o IKONOS (banda pancromática), ou mesmo o QuickBird, contudo, o leitor deverá ter o cuidado de verificar se as imagens são oblíquas ou nadirais, a fim de não ter problemas ao realizar a fusão, tais como fachadas indesejadas de prédios.

## 5.5 – METODOLOGIA

A metodologia apresentada provou ser eficiente e eficaz, ao se produzirem ortofotos e ortomosaicos usando meios próprios navais, cujos resultados foram considerados satisfatórios, se comparado a um vôo aerofotogramétrico. A integração de imagens de vídeo com dados do sensor HRV-pancromático para uso em atualização cartográfica náutica pode ser um fator complementar ao uso de ortomosaicos gerados a partir de imagens de vídeo.

O processo tem seu mérito, pois ao se verem os resultados alcançados na produção de ortofotos com uma câmara de vídeo comum, percebe-se o grande potencial

deste método para redução de custos e aumento da rapidez de processamento, pois as imagens são capturadas diretamente para o computador onde serão processadas, e o produto final também é gerado em meio digital. Sendo assim, conclui-se que o uso de imagens de vídeo tem grande potencial, apesar dos resultados atingidos ainda não serem comparáveis aos que seriam alcançados com câmaras métricas.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF PHOTOGRAMMETRY. **Manual of photogrammetry**. 1980.

AMORIM, A; SILVA, I.; TOMMASELLI, A. M. G. Utilização de modelos estereoscópicos híbridos na atualização cartográfica. **Boletim de Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná**, Curitiba, v. 7, n. 2, p 3-21, 2001.

ANDERSON, J. A.; CHAVEZ, P. S.; SIDES, S.C. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: LANDSAT TM and SPOT panchromatic. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 57, n. 3, p. 295-303, mar. 1991.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBBE, 1998.

ANDRÁDE, J. B.; OLIVAS, M. A. A. Calibração de câmaras aerofotogramétricas. **Boletim da Universidade Federal do Paraná**, Curitiba, nº 26, 1981.

BROWN, D. C. **An advanced reduction and calibration fot photogrammetric cameras**. EUA: Instrument Corp of Florida, 1964.

BROWN, D. C. **Decentering distortion and the definitive calibration of metric cameras**. The American Society of Photogrammetry Convention, mar., 1965.

BROWN, D. C. Decentering distortion of lenses. **Photogrammetric Engineering**. v. 32, n. 3, 1966.

BURROUGH, P. A. **Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation**. Journal of Soil Science 40, 477-492. 1989.

CARPER, W. J.; LILLESAND, T. M.; KIEFER, R.W. The use of intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 56, n. 4, p. 459-467, abr. 1990.

CHAVEZ, P. S. Digital merging of LANDSAT TM and digitized NHAP data fot 1:24,000-scale image mapping. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 52, n. 10, p. 1637-1646, out. 1986.

CHAVEZ, P. S.; KWARTENG, A. Y. Extracting spectral contrast in landsat thematic mapper imager data using selective principal component analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 55, n. 3, p. 339-348, out. 1989.

CHUVIECO, E. **Fundamentos de Teledetección Espacial**. Madri: Ediciones Rialp S.A., 1990.

D'ALGE, J. C. L.; FERREIRA, N. A. **Perspectivas de atualização do mapeamento sistemático através de imagens orbitais**. V Smpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, 1988.

DENT, B. D. **Principles of thematic map design**. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1985.

EL-HAKIM, S.F. Real-time image metrology with CCD cameras. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 52, n. 11, p. 1757-1766, nov. 1986.

ESTEIO ENGENHARIA E AEROLEVANTAMENTOS S. A. **Aerotriangulação**. Disponível em <[http://www.esteio.com.br/servicos/so\\_aerotriang.htm](http://www.esteio.com.br/servicos/so_aerotriang.htm)> Acesso em 14 out. 2002.

FERNANDES, R. A. **Cartografia náutica: aerotriangulação analítica em configuração analógica**. Curitiba, 1984. 183 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

FIANI, M.; VATORE, F. **An experiment of cartography production and updating using satellite images**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B4. Amsterdam, 2000.

GALO, M. **Calibração e aplicação de câmaras digitais**. Curitiba, 1993. 151 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná.

GALO, M.; HASEGAWA, J. K.; TOMMASELLI, A. M. G. Avaliação geométrica de câmaras de vídeo para uso em fotogrametria digital. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 2000, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Ed. UFPR, 1994.



GONZALEZ, R. C.; WOODS, R.E. **Processamento de imagens digitais**. Edgard Blücher Ltda. 2000.

JACK, K. Color spaces. In:\_\_\_\_\_. **Video demystified**. Eagle Rock, VA: LLH Technology Publishing, 2001. p. 15-34.

JAIN, R.; KASTURI, R.; SCHUNCK, B.G. **Machine Vision**. MIT Press and McGraw-Hill, Inc. 1995.

JONHSON, R. A.; WICHERN, D.W. **Applied multivariate statistical analysis**. 4. ed. Prentice-Hall, Inc. 1988.

JVC Company of America. **Two high performance dv camcorders added to cybercam line**. Disponível em <<http://www.jvc.com/company/press.jsp?pressType=2&item=97>> Acesso em 17 out. 2002.

LUGNANI, J. B. **Introdução à fototriangulação**. Curitiba: Ed UFPR, 1987.

MAGRO, F. H. S. Videogrametria. In:\_\_\_\_\_. **Cartografia e Cadastro**. Instituto Português de Cartografia e Cadastro, Lisboa, dez. 1995, nº 3. p. 35-40.

MAUSEL, P. W. et al. Airborne videography: current status and future perspectives. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 58, n. 8, p. 1189-1195, ago. 1992.

METTERNICHT, G. **Change detection assessment using fuzzy sets and remotely sensed data: an application of topographic map revision**. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (1999) 221-233.

MITISHITA, E. A. **Monorestituição digital de aerofotos, associada com sistema de computação gráfica CAD, para fins de mapeamento na área florestal**. Curitiba, 1997. 252 f. Dissertação (Doutorado em Ciências Florestais) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

MONIWA, H. **Analytical photogrammetric system with self-calibration and its applications**. Ph. D. Thesis, Department of Surveying Engineering, UNB, 1977.

NOVAC, K. **Analytical Photogrammetry (GS 628)**. Columbus, Ohio, 1991 Department of Geodetic Science and Surveying.

OLIVAS, M. A. A. **Calibração de câmaras fotogramétricas**. Curitiba, 1980. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná.

SCHOWENGERDT, R.A. Reconstruction of multispatial, multispectral image data using spatial frequency contents. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 46, n. 10, p. 1325-1334, out. 1980.

SCHOWENGERDT, R.A. **Techniques for image processing and classification in remote sensing**. Academic Press, Inc. 1983.

SPIRO, P. **Review of JVC miniDV GR-DV3 and GR-DVM5 digital camcorder**. Disponível em < <http://webhome.idirect.com/~spirop/dv3rev.htm> > Acesso em: 17 out. 2002.

ZADEH, L. **Fuzzy sets**. Information and Control 8, 338-353. 1965.

## APÊNDICE 1 – PROGRAMA PARA CÁLCULO DAS COORDENADAS DO CAMPO DE CALIBRAÇÃO POR INTERSEÇÃO AVANTE

```
%Este programa calcula coordenadas a partir de duas estações, por interseção
avante,
%origens das medições angulares nas próprias estações. A da esquerda é
considerada a
%origem (0,0,0), enquanto a da direita é sofre apenas variações em X e Y.
%O plano XY passa pelas duas estações, sendo vertical à superfície entre elas.
%O plano XZ também passa pelas duas estações, sendo perpendicular ao plano XY.
%O arquivo deve estar arranjado com as seguintes colunas: número do ponto;
ângulo horizontal esquerdo; ângulo vertical esquerdo; e ângulo horizontal
direito.
%O programa também calcula os erros das coordenadas, através de propagação de
covariâncias. Todos os ângulos deverão estar no formato graus e décimos de
graus.

clear all
clc
fi=input('Por favor, entre com o ângulo vertical entre as estações
(gg.ggggg)\n');
linc=input('Por favor, entre com a distância (inclinada) entre as estações (em
m)\n');
preclin=input('Por favor, entre com o erro da distância (em mm)\n');
precang=input('Por favor, entre com o erro angular (em segundos de arco)\n');
onde=input('Por favor, entre com o caminho do arquivo, SEM O NOME (não é
necessária a última barra)\n','s');
nome=input('Por favor, entre com o nome do arquivo de dados (*.dat), SEM A
EXTENSÃO\n','s');
ext='.dat';
caminho=strcat(onde,'\\',nome,ext);
disp('Lendo arquivo, por favor aguarde...');
eval(['load ' caminho]);

%Propagação da covariância para a base
sigma1=[(preclin/1000)^2    0
         0    ((precang/3600)*pi/180)^2];
D=[sin(fi*pi/180) linc*cos(fi*pi/180)];
sigbase=D*sigma1*D';

%Propagação da covariância para os ângulos
%Existem quatro ângulos (um é a soma de dois), porém somente três são
correlacionados.
%Consideram-se os ângulos como diferenças entre direções

matdif=[1 -1 0
        -1 0 1
         0 1 -1];

matang=[((precang/3600)*pi/180)^2 0 0
         0 ((precang/3600)*pi/180)^2 0
         0 0 ((precang/3600)*pi/180)^2];
```

```

sigang=matdif*matang*matdif';

%Montagem da matriz de variância-covariância base-ângulos
Sig(1,1)=sigbase;
Sig(2:4,2:4)=sigang;
Sig(5,5)=(precang/3600)*pi/180)^2;

numpts=size(eval(nome),1);
l=sym('l');
b=sym('b');
a=sym('a');
g=sym('g');
t=sym('t');
xs=(l*sin(b)/sin(g))*cos(a);
ys=(l*sin(b)/sin(g))*cot(t);
zs=(-l*sin(b)/sin(g))*sin(a);
dxl=diff(xs,'l');
dxg=diff(xs,'g');
dxg=diff(xs,'g');
dxg=diff(xs,'g');
dxb=diff(xs,'b');
dxa=diff(xs,'a');
dxt=diff(xs,'t');
dyl=diff(ys,'l');
dyg=diff(ys,'g');
dyb=diff(ys,'b');
dya=diff(ys,'a');
dyt=diff(ys,'t');
dzl=diff(zs,'l');
dzg=diff(zs,'g');
dzb=diff(zs,'b');
dza=diff(zs,'a');
dzt=diff(zs,'t');
l=linc*sin(fi*pi/180);
disp(strcat('Foram encontrados :',num2str(numpts),' pontos. Processando...'))
for i=1:numpts
    x(i)=l*sin((eval(strcat(nome, '(' ,num2str(i), ',4') )))*pi/180)*...
        cos((eval(strcat(nome, '(' ,num2str(i), ',2') )))*pi/180)/...

sin((eval(strcat(nome, '(' ,num2str(i), ',2')+',nome, '(' ,num2str(i), ',4') )))*pi/180);
    y(i)=l*sin((eval(strcat(nome, '(' ,num2str(i), ',4') )))*pi/180)*...
        cot((eval(strcat(nome, '(' ,num2str(i), ',3') )))*pi/180)/...

sin((eval(strcat(nome, '(' ,num2str(i), ',2')+',nome, '(' ,num2str(i), ',4') )))*pi/180);
    z(i)=-l*sin((eval(strcat(nome, '(' ,num2str(i), ',4') )))*pi/180)*...
        sin((eval(strcat(nome, '(' ,num2str(i), ',2') )))*pi/180)/...

sin((eval(strcat(nome, '(' ,num2str(i), ',2')+',nome, '(' ,num2str(i), ',4') )))*pi/180);
    a=(eval(strcat(nome, '(' ,num2str(i), ',2') )))*pi/180;
    b=(eval(strcat(nome, '(' ,num2str(i), ',4') )))*pi/180;
    t=(eval(strcat(nome, '(' ,num2str(i), ',3') )))*pi/180;
    g=a+b;
    j=3*i;
    T(j-2,1)=eval(dxl);

```

```

T(j-2,2)=eval(dxa);
T(j-2,3)=eval(dxb);
T(j-2,4)=eval(dxg);
T(j-2,5)=eval(dxt);
T(j-1,1)=eval(dyl);
T(j-1,2)=eval(dy a);
T(j-1,3)=eval(dy b);
T(j-1,4)=eval(dy g);
T(j-1,5)=eval(dyt);
T(j,1)=eval(dz1);
T(j,2)=eval(dza);
T(j,3)=eval(dzb);
T(j,4)=eval(dzg);
T(j,5)=eval(dzt);
M(i,1)=i;
M(i,2)=x(i);
M(i,3)=y(i);
M(i,4)=z(i);
end

%Cálculo dos erros das coordenadas (Propagação)
SIGFIN=T*Sig*T';
numsig=size(SIGFIN,1);

for m=1:3:numsig-2
    n=(m+2)/3;
    M(n,5)=sqrt(SIGFIN(m,m));
    M(n,6)=sqrt(SIGFIN(m+1,m+1));
    M(n,7)=sqrt(SIGFIN(m+2,m+2));
end

origem=input('Qual ponto deseja utilizar como origem?\n');
o(origem,2)=M(origem,2);
o(origem,3)=M(origem,3);
o(origem,4)=M(origem,4);

for k=1:numpts
    M(k,2)=M(k,2)-o(origem,2);
    M(k,3)=M(k,3)-o(origem,3);
    M(k,4)=M(k,4)-o(origem,4);
end

disp('Processamento encerrado. Sugiro verificar o arquivo "CPAREDE.DAT",')
disp('a fim de visualizar coordenadas e respectivos erros')
trilha=strcat(onde,'\cparede',ext);
u='save';
v='M -ascii -tabs';
c=' ';
eval([u c trilha c v])

```

## APÊNDICE 2 – PROGRAMA PARA CALIBRAÇÃO DE UMA CÂMARA DE VÍDEO ATRAVÉS DE IMAGENS CAPTURADAS PARA UM COMPUTADOR

```
%Este programa ajusta os parâmetros de calibração de uma câmera, baseando-se
%em medidas efetuadas pelo método das câmaras convergentes.
%O programa necessita ler um arquivo contendo as coordenadas X, Y e Z
%em metros dos pontos medidos na referência (parede), outro com as
%coordenadas em linha e coluna, posteriormente transformadas para milímetros,
e mais um
%referente aos parâmetros kappa, fi, ômega, X0, Y0 e Z0.
%A organização do arquivo de coordenadas X, Y e Z é a seguinte:
%o número do ponto (só algarismos); a coordenada X (metros); a coordenada Y
(metros);
%a coordenada Z (metros, não nula); as variações de X, Y e Z em milímetros;
%os desvios-padrão de cada coordenada, e se o ponto está "ligado", ou seja,
%se ele entrará nas injunções de posição e distância.
%A organização do arquivo de coordenadas x e y (imagem digital, em pixels) é a
seguinte:
%o número do ponto (só algarismos); o número da foto (só algarismos);
%a coordenada x (pixels); e a coordenada y(pixels).
%A organização do arquivo de parâmetros da imagem digital é a seguinte:
%o número da foto (só algarismos); kappa; fi; ômega; X0; Y0; e Z0.

clear all
clc
format short g
cwd = pwd;
cd(tempdir);
pack
cd(cwd)
%Leitura dos arquivos de dados
ondeim=input('Entre com o caminho do arquivo de dados da imagem (pixels) (sem
a última barra)\n','s');
nomeim=input('Entre com o nome do arquivo de dados da imagem (*.dat), SEM A
EXTENSÃO\n','s');
trilhaim=strcat(ondeim,'\',nomeim,'.dat');
eval(['load ' trilhaim]);
ondepts=input('Entre com o caminho do arquivo de pontos de referência (metros)
(sem a última barra)\n','s');
nomepts=input('Entre com o nome do arquivo de pontos de referência (*.dat),
SEM A EXTENSÃO\n','s');
trilhpts=strcat(ondepts,'\',nomepts,'.dat');
eval(['load ' trilhpts]);
ondepar=input('Entre com o caminho do arquivo de parâmetros da estação de
exposição (sem a última barra)\n','s');
nomepar=input('Entre com o nome do arquivo de parâmetros da estação de
exposição (*.dat), SEM A EXTENSÃO\n','s');
trilhpar=strcat(ondepar,'\',nomepar,'.dat');
eval(['load ' trilhpar]);
parcontrole=eval(nomepts); %Pois para calcular o valor de epsilon (Uc),
%os valores de X, Y e Z devem ser os mesmos
nfot=size(eval(nomepar),1);
%Ajustamento entre a imagem da câmera e a imagem capturada
camhor=input('Entre com a dimensão horizontal (mm) do sensor da câmera\n');
camver=input('Entre com a dimensão vertical (mm) do sensor da câmera\n');
```

```

dstfc=input('Entre com o valor da distância focal(mm)\n');
imcol=input('Entre com o número de colunas da imagem capturada\n');
imlin=input('Entre com o número de linhas da imagem capturada\n');
precpix=input('Quantos pixels deseja como precisão (o valor não precisa ser
inteiro)?\n');
sigx=precpix*camhor/imcol;
sigy=precpix*camver/imlin;

for alfa=1:nfot
    kv(alfa)=eval(strcat(nomepar, '(' , num2str(alfa), ', 2) '));
    fv(alfa)=eval(strcat(nomepar, '(' , num2str(alfa), ', 3) '));
    ov(alfa)=eval(strcat(nomepar, '(' , num2str(alfa), ', 4) '));
    %Os valores X0, Y0 e Z0 referem-se às coordenadas do CENTRO DE PROJEÇÃO
    X0v(alfa)=eval(strcat(nomepar, '(' , num2str(alfa), ', 5) '));
    Y0v(alfa)=eval(strcat(nomepar, '(' , num2str(alfa), ', 6) '));
    Z0v(alfa)=eval(strcat(nomepar, '(' , num2str(alfa), ', 7) '));
end

%Transformação das coordenadas de imagem (pixels) para fotogramétricas
(pixels)
disp('Transformando coordenadas de imagem (pixels) para milímetros...')
numim=size(eval(nomeim),1);
for fa=1:numim
    eval(strcat(nomeim, ' (fa,3)=', num2str((eval(strcat(nomeim, ' (fa,3)+1'))-...
        imcol/2)*camhor/imcol), ', ;'))
    eval(strcat(nomeim, ' (fa,4)=', num2str((imlin/2-
eval(strcat(nomeim, ' (fa,4)+1')))...
        *camver/imlin), ', ;'))
end

disp('Terminado.')

%Início da processo de ajustamento do parâmetros de calibração
disp('Montando os elementos da matriz de rotação e equações de colinaridade')
kv=kv*pi/180;
fv=fv*pi/180;
ov=ov*pi/180;
k=sym('k');
f=sym('f');
om=sym('om');
X0=sym('X0');
Y0=sym('Y0');
Z0=sym('Z0');
X=sym('X');
Y=sym('Y');
Z=sym('Z');
c=sym('c');
xf=sym('xf');
yf=sym('yf');
x0=sym('x0');
y0=sym('y0');
K1=sym('K1');
K2=sym('K2');
K3=sym('K3');
P1=sym('P1');

```

```

P2=sym('P2');
Ad=sym('Ad');
Bd=sym('Bd');

%Coeficientes das equações de colinearidade
m11=cos(f)*cos(k);
m12=cos(om)*sin(k)+sin(om)*sin(f)*cos(k);
m13=sin(om)*sin(k)-cos(om)*sin(f)*cos(k);
m21=-cos(f)*sin(k);
m22=cos(om)*cos(k)-sin(om)*sin(f)*sin(k);
m23=sin(om)*cos(k)+cos(om)*sin(f)*sin(k);
m31=sin(f);
m32=-sin(om)*cos(f);
m33=cos(om)*cos(f);
x=-c*((m11*(X-X0)+m12*(Y-Y0)+m13*(Z-Z0))/(m31*(X-X0)+m32*(Y-Y0)+m33*(Z-Z0)));
y=-c*((m21*(X-X0)+m22*(Y-Y0)+m23*(Z-Z0))/(m31*(X-X0)+m32*(Y-Y0)+m33*(Z-Z0)));
r=sqrt((xf-x0)^2+(yf-y0)^2);
ddx=P1*(r^2+2*((xf-x0)^2))+2*P2*(xf-x0)*(yf-y0);
ddy=P2*(r^2+2*((yf-y0)^2))+2*P1*(xf-x0)*(yf-y0);
drx=(xf-x0)*(K1*(r^2)+K2*(r^4)+K3*(r^6));
dry=(yf-y0)*(K1*(r^2)+K2*(r^4)+K3*(r^6));
dax=Aq*(xf-x0);
day=Bd*(xf-x0);
Fx=xf-x-x0-drx-ddx-dax;
Fy=yf-y-y0-dry-ddy-day;
xcalc=x+x0+drx+ddx+dax;
ycalc=y+y0+dry+ddy+day;

%Fazendo as derivadas em relação aos parâmetros e valores de X, Y e Z
xk=diff(Fx,'k');
xfi=diff(Fx,'f');
xom=diff(Fx,'om');
xX0=diff(Fx,'X0');
xY0=diff(Fx,'Y0');
xZ0=diff(Fx,'Z0');
xX=diff(Fx,'X');
xY=diff(Fx,'Y');
xZ=diff(Fx,'Z');
xx0=diff(Fx,'x0');
xy0=diff(Fx,'y0');
xc=diff(Fx,'c');
xk1=diff(Fx,'K1');
xk2=diff(Fx,'K2');
xk3=diff(Fx,'K3');
xpl=diff(Fx,'P1');
xp2=diff(Fx,'P2');
xa=diff(Fx,'Ad');
xb=diff(Fx,'Bd');
yk=diff(Fy,'k');
yfi=diff(Fy,'f');
yom=diff(Fy,'om');
yX0=diff(Fy,'X0');
yY0=diff(Fy,'Y0');
yZ0=diff(Fy,'Z0');
yX=diff(Fy,'X');

```



```

yY=diff(Fy,'Y');
yZ=diff(Fy,'Z');
yx0=diff(Fy,'x0');
yy0=diff(Fy,'y0');
yc=diff(Fy,'c');
yk1=diff(Fy,'K1');
yk2=diff(Fy,'K2');
yk3=diff(Fy,'K3');
yp1=diff(Fy,'P1');
yp2=diff(Fy,'P2');
ya=diff(Fy,'Ad');
yb=diff(Fy,'Bd');

%Para permitir a alocação das diferenciações em relação às coordenadas
nco=6*nfot+1;
npts=size(eval(nomepts),1);

%Inicialização dos valores constantes para todos os elementos (parâmetros).
disp('Inicializando valores para o vetor X.')
x0=0;
y0=0;
c=dstfç;
K1=0;
K2=0;
K3=0;
P1=0;
P2=0;
Ad=0;
Bd=0;

%Inicialização do vetor de valores aproximados dos parâmetros

for al=1:6:nco-6 %porque são seis os parâmetros de orientação exterior.
    am=(al+5)/6;
    Xv0(al,1)=kv(am);
    Xv0(al+1,1)=fv(am);
    Xv0(al+2,1)=ov(am);
    Xv0(al+3,1)=X0v(am);
    Xv0(al+4,1)=Y0v(am);
    Xv0(al+5,1)=Z0v(am);
end

for ak=nco:3:nco+3*npts-2
    an=((ak-nco)+3)/3; %apenas uma transformação para compensar os
    %parâmetros anteriores(k,f,om,etc.)
    Xv0(ak,1)=eval(strcat(nomepts,'(an,2)'));
    Xv0(ak+1,1)=eval(strcat(nomepts,'(an,3)'));
    Xv0(ak+2,1)=eval(strcat(nomepts,'(an,4)'));
end
Xv0(ak+3,1)=x0;
Xv0(ak+4,1)=y0;
Xv0(ak+5,1)=c;
Xv0(ak+6,1)=K1;
Xv0(ak+7,1)=K2;
Xv0(ak+8,1)=K3;

```

```

Xv0(ak+9,1)=P1;
Xv0(ak+10,1)=P2;
Xv0(ak+11,1)=Ad;
Xv0(ak+12,1)=Bd;
%Montando as matrizes do ajustamento pelo método paramétrico com injunções
disp('Montando a matriz A e vetores X e W do ajustamento pelo método
paramétrico (injunções)...')
disp('Isto pode levar alguns minutos...')

%Início das iterações
disp('Iniciando iterações')
iter=0;
contr=0;
%Matriz A
disp(strcat('Total de linhas :',num2str(2*numim),'.'))

for aj=1:2:2*numim-1
    P(aj,aj)=1/(sigx^2);
    P(aj+1,aj+1)=1/(sigy^2);
end

%Economia de memória
cwd = pwd;
cd(tempdir);
pack
cd(cwd)

while iter<100 & contr==0
    %Valores variáveis para cada ponto da função (observações)
    for j=1:2:2*numim-1
        disp(strcat('Montando e tornando numéricas as linhas :',num2str(j),'; e
'...
',num2str(j+1),'.'))
        m=(j+1)/2;
        k=Xv0(6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-5,1);
        f=Xv0(6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-4,1);
        om=Xv0(6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-3,1);
        X0=Xv0(6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-2,1);
        Y0=Xv0(6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-1,1);
        Z0=Xv0(6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)'))),1);
        X=Xv0(nco+3*(eval(strcat(nomeim,'(m,1)')))-3,1);
        Y=Xv0(nco+3*(eval(strcat(nomeim,'(m,1)')))-2,1);
        Z=Xv0(nco+3*(eval(strcat(nomeim,'(m,1)')))-1,1);
        xf=eval(strcat(nomeim,'(m,3)'));
        yf=eval(strcat(nomeim,'(m,4)'));
        A(j,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-5)=eval(xk);
        A(j,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-4)=eval(xfi);
        A(j,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-3)=eval(xom);
        A(j,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-2)=eval(xX0);
        A(j,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-1)=eval(xY0);
        A(j,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)'))))=eval(xZ0);
        A(j,nco+3*(eval(strcat(nomeim,'(m,1)')))-3)=eval(xX);
        A(j,nco+3*(eval(strcat(nomeim,'(m,1)')))-2)=eval(xY);
        A(j,nco+3*(eval(strcat(nomeim,'(m,1)')))-1)=eval(xZ);
        A(j,nco+3*npts)=eval(xx0);
    end
    iter=iter+1;
    contr=contr+1;
end

```

```

A(j,nco+3*npts+1)=eval(xy0);
A(j,nco+3*npts+2)=eval(xc);
A(j,nco+3*npts+3)=eval(xk1);
A(j,nco+3*npts+4)=eval(xk2);
A(j,nco+3*npts+5)=eval(xk3);
A(j,nco+3*npts+6)=eval(xp1);
A(j,nco+3*npts+7)=eval(xp2);
A(j,nco+3*npts+8)=eval(xa);
A(j,nco+3*npts+9)=eval(xb);
A(j+1,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-5)=eval(yk);
A(j+1,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-4)=eval(yfi);
A(j+1,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-3)=eval(yom);
A(j+1,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-2)=eval(yX0);
A(j+1,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-1)=eval(yY0);
A(j+1,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)'))))=eval(yZ0);
A(j+1,nco+3*(eval(strcat(nomeim,'(m,1)')))-3)=eval(yX);
A(j+1,nco+3*(eval(strcat(nomeim,'(m,1)')))-2)=eval(yY);
A(j+1,nco+3*(eval(strcat(nomeim,'(m,1)')))-1)=eval(yZ);
A(j+1,nco+3*npts)=eval(yx0);
A(j+1,nco+3*npts+1)=eval(yy0);
A(j+1,nco+3*npts+2)=eval(yc);
A(j+1,nco+3*npts+3)=eval(yk1);
A(j+1,nco+3*npts+4)=eval(yk2);
A(j+1,nco+3*npts+5)=eval(yk3);
A(j+1,nco+3*npts+6)=eval(yp1);
A(j+1,nco+3*npts+7)=eval(yp2);
A(j+1,nco+3*npts+8)=eval(ya);
A(j+1,nco+3*npts+9)=eval(yb);

%Vetor W.
W(j,1)=xf-eval(xcalc);
W(j+1,1)=yf-eval(ycalc);

end

disp('Terminado.')

%Aplicação das injunções de posição

%As injunções de posição fixam os pontos de controle
N=A'*P*A;
U=A'*P*W;

disp('Aplicando injunções de posição à matriz N.')
for nli=nco+3:(nco+3*npts)-2
    cont=((nli-nco)+3)/3;
    if parcontrole(cont,8)
        N(nli,nli)=N(nli,nli)+inv((parcontrole(cont,5))^2);
        N(nli+1,nli+1)=N(nli+1,nli+1)+inv((parcontrole(cont,6))^2);
        N(nli+2,nli+2)=N(nli+2,nli+2)+inv((parcontrole(cont,7))^2);
    end
end
clear cont

disp('Aplicando injunções de posição ao vetor U.')

```

```

for uli=nco:3:(nco+3*npts)-2
    cont=((uli-nco)+3)/3;
    if parcontrole(cont,8)
        epsilon(uli-nco+1,1)=Xv0(uli,1)-parcontrole(cont,2);
        epsilon(uli-nco+2,1)=Xv0(uli+1,1)-parcontrole(cont,3);
        epsilon(uli-nco+3,1)=Xv0(uli+2,1)-parcontrole(cont,4);
        for fpeso=1:3:3*npts-2
            pesot=(fpeso+2)/3;
            Pt(fpeso,fpeso)=inv(parcontrole(pesot,5)^2);
            Pt(fpeso+1,fpeso+1)=inv(parcontrole(pesot,6)^2);
            Pt(fpeso+2,fpeso+2)=inv(parcontrole(pesot,7)^2);
        end
        U(uli,1)=U(uli,1)+(inv(parcontrole(cont,5))^2)*(Xv0(uli,1)-
parcontrole(cont,2));
        U(uli+1,1)=U(uli+1,1)+(inv(parcontrole(cont,6))^2)*(Xv0(uli+1,1)-
parcontrole(cont,3));
        U(uli+2,1)=U(uli+2,1)+(inv(parcontrole(cont,7))^2)*(Xv0(uli+2,1)-
parcontrole(cont,4));
    end
end

%Cálculo do vetor de correções "X"

Xv=-(inv(N))*(U);
Xva=Xv0+Xv;
limite=max(abs(Xv));
if limite<sigx
    contr=100;
    Xv0=Xva;
else
    Xv0=Xva;
    x0=Xv0(nco+3*npts,1);
    y0=Xv0(nco+3*npts+1,1);
    c=Xv0(nco+3*npts+2,1);
    K1=Xv0(nco+3*npts+3,1);
    K2=Xv0(nco+3*npts+4,1);
    K3=Xv0(nco+3*npts+5,1);
    P1=Xv0(nco+3*npts+6,1);
    P2=Xv0(nco+3*npts+7,1);
    Ad=Xv0(nco+3*npts+8,1);
    Bd=Xv0(nco+3*npts+9,1);
    iter=iter+1
    limite
end
end

iter=iter+1
limite

%Número total de injunções
totinj=0;
for ti=1:npts
    if parcontrole(ti,8)
        totinj=totinj+3;
    end
end

```

```

end

disp('Calculando o resíduo médio das observações (em mm)')
V=A*Xv+W;
%Média dos resíduos
resmed=mean(abs(V));
disp(strcat('O resíduo médio das observações encontrado foi:
',num2str(resmed),'mm.'))

disp('Calculando a variância de peso unitário "a posteriori"')
%Número de graus de liberdade
glib=(size(A,1)-size(A,2))+totinj;
sigpos=(V'*P*V+epsilon'*Pt*epsilon)/glib;
chiq=sigpos*glib;
disp(strcat('Graus de liberdade: ',num2str(glib),'.'))
disp(strcat('A variância de peso unitário "a posteriori" calculada foi:
',num2str(sigpos),'.'))
disp(strcat('O valor de "chi" quadrado calculado foi: ',num2str(chiq),'.'))
chimin=chi2inv(0.05,glib);
chimax=chi2inv(0.95,glib);
disp(strcat('Valor mínimo de chi (5%): ',num2str(chimin),'.'))
disp(strcat('Valor máximo de chi (95%): ',num2str(chimax),'.'))
if chiq<=chimax & chiq>=chimin
    disp('O ajustamento passou pelo teste de chi quadrado (significância de
5%).')
else
    disp('O ajustamento foi reprovado pelo teste de chi quadrado (significância
de 5%).')
end
chimin2=chi2inv(0.01,glib);
chimax2=chi2inv(0.99,glib);
disp(strcat('Valor mínimo de chi (1%): ',num2str(chimin2),'.'))
disp(strcat('Valor máximo de chi (99%): ',num2str(chimax2),'.'))
if chiq<=chimax & chiq>=chimin
    disp('O ajustamento passou pelo teste de chi quadrado (significância de
1%).')
else
    disp('O ajustamento foi reprovado pelo teste de chi quadrado (significância
de 1%).')
end

mvc=sigpos*(inv(N));
save f:\disk\sigma.dat mvc -ascii -tabs
disp('A matriz variância-covariância foi salva no arquivo SIGMA.DAT.')

for fim=1:6:6*nfot-5
    final=(fim+5)/6;
    kv(final)=Xv0(fim,1);
    fv(final)=Xv0(fim+1,1);
    ov(final)=Xv0(fim+2,1);
    X0v(final)=Xv0(fim+3,1);
    Y0v(final)=Xv0(fim+4,1);
    Z0v(final)=Xv0(fim+5,1);
end

```

```
kv=kv*180/pi;
fv=fv*180/pi;
ov=ov*180/pi;

orifotos=[kv
          fv
          ov
          X0v
          Y0v
          Z0v];
paracam=[x0
          y0
          c
          K1
          K2
          K3
          P1
          P2
          Ad
          Bd];

save f:\disk\orifotos.dat orifotos -ascii -tabs
save f:\disk\paracam.dat paracam -ascii -tabs
```

### APÊNDICE 3 – PROGRAMA PARA AEROTRIANGULAÇÃO ATRAVÉS DE IMAGENS CAPTURADAS PARA UM COMPUTADOR

```
%Este programa ajusta uma aerotriangulação, tendo como dados alguns arquivos
iniciais.
%O programa necessita ler um arquivo contendo as coordenadas X, Y e Z
%em metros dos pontos medidos na referência (geodésicos, E, N e h), outro com
as
%coordenadas em linha e coluna, posteriormente transformadas para milímetros,
e mais um
%referente aos parâmetros kappa, fi, ômega, X0, Y0 e Z0.
%A organização do arquivo de coordenadas E, N e h é a seguinte:
%o número do ponto (só algarismos); a coordenada E (metros); a coordenada N
(metros);
%a coordenada h (metros, não nula); os desvios-padrão de cada coordenada
(mesma unidade);
%e se o ponto está "ligado" ("1" para ligado, "0" para desligado), ou seja,
%se ele entrará nas injunções de posição e distância.
%A organização do arquivo de coordenadas x e y (imagem digital, em pixels) é a
seguinte:
%o número do ponto (só algarismos); o número da foto (só algarismos);
%a coordenada x (pixels); e a coordenada y (pixels).
%A organização do arquivo de parâmetros é a seguinte: x0; y0; c; K1; K2; K3;
P1;
%P2; A; e B.
%Caso algum valor não seja significativo, deixá-lo como sendo igual a zero.
%A organização do arquivo de parâmetros da imagem digital é a seguinte:
%o número da foto (só algarismos); kappa; fi; ômega; X0; Y0; e Z0.

clear all
clc
format short g

%Leitura dos arquivos de dados
ondeim=input('Entre com o caminho do arquivo de dados da imagem (pixels) (sem
a última barra)\n','s');
nomeim=input('Entre com o nome do arquivo de dados da imagem (*.dat), SEM A
EXTENSÃO\n','s');
trilhaim=strcat(ondeim,'\ ',nomeim,'.dat');
eval(['load ' trilhaim]);
ondepts=input('Entre com o caminho do arquivo de pontos de referência (metros)
(sem a última barra)\n','s');
nomepts=input('Entre com o nome do arquivo de pontos de referência (*.dat),
SEM A EXTENSÃO\n','s');
trilhpts=strcat(ondepts,'\ ',nomepts,'.dat');
eval(['load ' trilhpts]);
ondepar=input('Entre com o caminho do arquivo de parâmetros da estação de
exposição (sem a última barra)\n','s');
nomepar=input('Entre com o nome do arquivo de parâmetros da estação de
exposição (*.dat), SEM A EXTENSÃO\n','s');
trilhpar=strcat(ondepar,'\ ',nomepar,'.dat');
eval(['load ' trilhpar]);
ondeparc=input('Entre com o caminho do arquivo de parâmetros de calibração
(sem a última barra)\n','s');
```

```

nomeparc=input('Entre com o nome do arquivo de parâmetros de calibração
(*.dat), SEM A EXTENSÃO\n','s');
trilhaparc=strcat(ondeparc,'\ ',nomeparc,'.dat');
eval(['load ' trilhaparc]);
parcontrole=eval(nomepts); %Pois para calcular o valor de epsilon (Uc),
%os valores de X, Y e Z devem ser os mesmos
nfot=size(eval(nomepar),1);
%Ajustamento entre a imagem da câmera e a imagem capturada
camhor=input('Entre com a dimensão horizontal (mm) do sensor da câmera\n');
camver=input('Entre com a dimensão vertical (mm) do sensor da câmera\n');
c=eval(strcat(nomeparc,'(3,1)'));
imcol=input('Entre com o número de colunas da imagem capturada\n');
imlin=input('Entre com o número de linhas da imagem capturada\n');
precpix=input('Quantos pixels deseja como precisão (o valor não precisa ser
inteiro)?\n');

sigx=precpix*camhor/imcol;
sigy=precpix*camver/imlin;

for alfa=1:nfot
    kv(alfa)=eval(strcat(nomepar,'(',num2str(alfa),',2)'));
    fv(alfa)=eval(strcat(nomepar,'(',num2str(alfa),',3)'));
    ov(alfa)=eval(strcat(nomepar,'(',num2str(alfa),',4)'));
    %Os valores X0, Y0 e Z0 referem-se às coordenadas do CENTRO DE PROJEÇÃO
    X0v(alfa)=eval(strcat(nomepar,'(',num2str(alfa),',5)'));
    Y0v(alfa)=eval(strcat(nomepar,'(',num2str(alfa),',6)'));
    Z0v(alfa)=eval(strcat(nomepar,'(',num2str(alfa),',7)'));
end

%Transformação das coordenadas de imagem (pixels) para fotogramétricas
(pixels)
disp('Transformando coordenadas de imagem (pixels) para milímetros...')
numim=size(eval(nomeim),1);
for fa=1:numim
    eval(strcat(nomeim,'(fa,3)=',num2str((eval(strcat(nomeim,'(fa,3)+1'))-...
        imcol/2)*camhor/imcol),';'))
    eval(strcat(nomeim,'(fa,4)=',num2str((imlin/2-
eval(strcat(nomeim,'(fa,4)+1')))...
        *camver/imlin),';'))
end

disp('Terminado..')

%Correção das distorções
disp('Corrigindo as coordenadas dos erros sistemáticos da imagem')

%Foi adotado um valor médio de "K", para a refração fotogramétrica, igual a
3.05e-05
K=3.05e-5;

for ga=1:numim
    %Correção da distorção radial simétrica
    xp=eval(strcat(nomeim,'(ga,3)-',nomeparc,'(1,1)'));
    yp=eval(strcat(nomeim,'(ga,4)-',nomeparc,'(2,1)'));
    r=sqrt(xp^2+yp^2);

```



```

    eval(strcat(nomeim,'(ga,3)=xp-
xp*(',' nomeparc,'(4,1)*r^2+', nomeparc,'(5,1)*r^4+'...
    , nomeparc,'(6,1)*r^6);'))
    eval(strcat(nomeim,'(ga,4)=yp-
yp*(',' nomeparc,'(4,1)*r^2+', nomeparc,'(5,1)*r^4+'...
    , nomeparc,'(6,1)*r^6);'))

%Correção da distorção descentrada
eval(strcat(nomeim,'(ga,3)=', nomeim,'(ga,3)-
(',' nomeparc,'(7,1)*(r^2+2*xp^2)+2*',...
    nomeparc,'(8,1)*xp*yp);'))
eval(strcat(nomeim,'(ga,4)=', nomeim,'(ga,4)-
(2*', nomeparc,'(7,1)*xp*yp+',...
    nomeparc,'(8,1)*(r^2+2*yp^2));'))

%Correção da escala e ortogonalidade dos eixos
eval(strcat(nomeim,'(ga,3)=', nomeim,'(ga,3)-', nomeparc,'(9,1)*xp;'))
eval(strcat(nomeim,'(ga,4)=', nomeim,'(ga,4)-', nomeparc,'(10,1)*yp;'))

%Correção da refração fotogramétrica
eval(strcat(nomeim,'(ga,3)=', nomeim,'(ga,3)-
K*xp*(1+r^2/', nomeparc,'(3,1)^2);'))
eval(strcat(nomeim,'(ga,4)=', nomeim,'(ga,4)-
K*yp*(1+r^2/', nomeparc,'(3,1)^2);'))
end

disp('Terminado.')

%Início da processo de ajustamento do parâmetros de calibração
disp('Montando os elementos da matriz de rotação e equações de colinearidade')
kv=kv*pi/180;
fv=fv*pi/180;
ov=ov*pi/180;
k=sym('k');
f=sym('f');
om=sym('om');
X0=sym('X0');
Y0=sym('Y0');
Z0=sym('Z0');
X=sym('X');
Y=sym('Y');
Z=sym('Z');

%Coeficientes das equações de colinearidade
m11=cos(f)*cos(k);
m12=cos(om)*sin(k)+sin(om)*sin(f)*cos(k);
m13=sin(om)*sin(k)-cos(om)*sin(f)*cos(k);
m21=-cos(f)*sin(k);
m22=cos(om)*cos(k)-sin(om)*sin(f)*sin(k);
m23=sin(om)*cos(k)+cos(om)*sin(f)*sin(k);
m31=sin(f);
m32=-sin(om)*cos(f);
m33=cos(om)*cos(f);
Fx=-c*((m11*(X-X0)+m12*(Y-Y0)+m13*(Z-Z0))/(m31*(X-X0)+m32*(Y-Y0)+m33*(Z-Z0)));
Fy=-c*((m21*(X-X0)+m22*(Y-Y0)+m23*(Z-Z0))/(m31*(X-X0)+m32*(Y-Y0)+m33*(Z-Z0)));

```

```

%Fazendo as derivadas em relação aos parâmetros e valores de X, Y e Z
xk=diff(Fx,'k');
xfi=diff(Fx,'f');
xom=diff(Fx,'om');
xX0=diff(Fx,'X0');
xY0=diff(Fx,'Y0');
xZ0=diff(Fx,'Z0');
xX=diff(Fx,'X');
xY=diff(Fx,'Y');
xZ=diff(Fx,'Z');
yk=diff(Fy,'k');
yfi=diff(Fy,'f');
yom=diff(Fy,'om');
yX0=diff(Fy,'X0');
yY0=diff(Fy,'Y0');
yZ0=diff(Fy,'Z0');
yX=diff(Fy,'X');
yY=diff(Fy,'Y');
yZ=diff(Fy,'Z');

%Para permitir a alocação das diferenciações em relação às coordenadas
nco=6*nfot+1;
npts=size(eval(nomepts),1);

%Inicialização dos valores constantes para todos os elementos (parâmetros).
disp('Iniciando valores para o vetor X.')

%Inicialização do vetor de valores aproximados dos parâmetros

for al=1:6:nco-6 %porque são seis os parâmetros de orientação exterior.
    am=(al+5)/6;
    Xv0(al,1)=kv(am);
    Xv0(al+1,1)=fv(am);
    Xv0(al+2,1)=ov(am);
    Xv0(al+3,1)=X0v(am);
    Xv0(al+4,1)=Y0v(am);
    Xv0(al+5,1)=Z0v(am);
end

for ak=nco:3:nco+3*npts-2
    an=((ak-nco)+3)/3; %apenas uma transformação para compensar os
    %parâmetros anteriores(x,f,om,etc.)
    Xv0(ak,1)=eval(strcat(nomepts,'(an,2)'));
    Xv0(ak+1,1)=eval(strcat(nomepts,'(an,3)'));
    Xv0(ak+2,1)=eval(strcat(nomepts,'(an,4)'));
end

%Montando as matrizes do ajustamento pelo método paramétrico com injunções
disp('Montando a matriz A e vetores X e W do ajustamento pelo método
paramétrico (injunções)...')
disp('Isto pode levar alguns minutos...')

%Início das iterações
disp('Iniciando iterações')

```

```

iter=0;
contr=0;
%Matriz A
disp(strcat('Total de linhas :',num2str(2*numim),'.'))

for aj=1:2:2*numim-1
    P(aj,aj)=1/(sigx^2);
    P(aj+1,aj+1)=1/(sigy^2);
end

%Criar os pesos das observações geodésicas
for fpeso=1:3:3*npts-2
    pesot=(fpeso+2)/3;
    Pt(fpeso,fpeso)=inv(parcontrole(pesot,5)^2);
    Pt(fpeso+1,fpeso+1)=inv(parcontrole(pesot,6)^2);
    Pt(fpeso+2,fpeso+2)=inv(parcontrole(pesot,7)^2);
end

while iter<100 & contr==0
    %Valores variáveis para cada ponto da função (observações)
    for j=1:2:2*numim-1
        disp(strcat('Montando e tornando numéricas as linhas :',num2str(j),'; e
        '...
        ,num2str(j+1),'.'))
        m=(j+1)/2;
        k=Xv0(6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-5,1);
        f=Xv0(6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-4,1);
        om=Xv0(6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-3,1);
        X0=Xv0(6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-2,1);
        Y0=Xv0(6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-1,1);
        Z0=Xv0(6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)'))),1);
        X=Xv0(nco+3*(eval(strcat(nomeim,'(m,1)')))-3,1);
        Y=Xv0(nco+3*(eval(strcat(nomeim,'(m,1)')))-2,1);
        Z=Xv0(nco+3*(eval(strcat(nomeim,'(m,1)')))-1,1);
        xp=eval(strcat(nomeim,'(m,3)'));
        yp=eval(strcat(nomeim,'(m,4)'));
        A(j,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-5)=eval(xk);
        A(j,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-4)=eval(xfi);
        A(j,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-3)=eval(xom);
        A(j,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-2)=eval(xX0);
        A(j,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-1)=eval(xY0);
        A(j,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)'))))=eval(xZ0);
        A(j,nco+3*(eval(strcat(nomeim,'(m,1)')))-3)=eval(xX);
        A(j,nco+3*(eval(strcat(nomeim,'(m,1)')))-2)=eval(xY);
        A(j,nco+3*(eval(strcat(nomeim,'(m,1)')))-1)=eval(xZ);
        A(j+1,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-5)=eval(yk);
        A(j+1,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-4)=eval(yfi);
        A(j+1,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-3)=eval(yom);
        A(j+1,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-2)=eval(yX0);
        A(j+1,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)')))-1)=eval(yY0);
        A(j+1,6*(eval(strcat(nomeim,'(m,2)'))))=eval(yZ0);
        A(j+1,nco+3*(eval(strcat(nomeim,'(m,1)')))-3)=eval(yX);
        A(j+1,nco+3*(eval(strcat(nomeim,'(m,1)')))-2)=eval(yY);
        A(j+1,nco+3*(eval(strcat(nomeim,'(m,1)')))-1)=eval(yZ);
    end
end

```

```

    %Vetor W.
    W(j,1)=eval(Fx)-xp;
    W(j+1,1)=eval(Fy)-yp;

end

disp('Terminado.')

%Aplicação das injunções de posição

%As injunções de posição fixam os pontos de controle
N=A'*P*A;
U=A'*P*W;

disp('Aplicando injunções de posição à matriz N.')
for nli=nco:3:(nco+3*npts)-2
    cont=((nli-nco)+3)/3;
    if parcontrole(cont,8)
        N(nli,nli)=N(nli,nli)+inv((parcontrole(cont,5))^2);
        N(nli+1,nli+1)=N(nli+1,nli+1)+inv((parcontrole(cont,6))^2);
        N(nli+2,nli+2)=N(nli+2,nli+2)+inv((parcontrole(cont,7))^2);
    end
end
clear cont

disp('Aplicando injunções de posição ao vetor U.')
for uli=nco:3:(nco+3*npts)-2
    cont=((uli-nco)+3)/3;
    if parcontrole(cont,8)
        epsilon(uli-nco+1,1)=Xv0(uli,1)-parcontrole(cont,2);
        epsilon(uli-nco+2,1)=Xv0(uli+1,1)-parcontrole(cont,3);
        epsilon(uli-nco+3,1)=Xv0(uli+2,1)-parcontrole(cont,4);
        U(uli,1)=U(uli,1)+(inv(parcontrole(cont,5))^2)*(Xv0(uli,1)-
parcontrole(cont,2));
        U(uli+1,1)=U(uli+1,1)+(inv(parcontrole(cont,6))^2)*(Xv0(uli+1,1)-...
        parcontrole(cont,3));
        U(uli+2,1)=U(uli+2,1)+(inv(parcontrole(cont,7))^2)*(Xv0(uli+2,1)-...
        parcontrole(cont,4));
    end
end

%Cálculo do vetor de correções "X"

Xv=-(inv(N))*(U);
Xva=Xv0+Xv;
limite=max(abs(Xv));
if limite<sigx
    contr=100;
    Xv0=Xva;
else
    Xv0=Xva;
    iter=iter+1
    limite
end
end
end

```

```

iter=iter+1
limite

%Número total de injunções
totinj=0;
for ti=1:npts
    if parcontrole(ti,8)
        totinj=totinj+3;
    end
end

disp('Calculando o resíduo médio das observações (em mm)')
V=A*Xv+W;
%Média dos resíduos
resmed=mean(abs(V));
disp(strcat('O resíduo médio das observações encontrado foi:
',num2str(resmed),'mm.'))

disp('Calculando a variância de peso unitário "a posteriori"')
%Número de graus de liberdade
glib=(size(A,1)-size(A,2))+totinj;
sigpos=(V'*P*V+epsilon'*Pt*epsilon)/glib;
chiq=sigpos*glib;
disp(strcat('Graus de liberdade: ',num2str(glib),'.'))
disp(strcat('A variância de peso unitário "a posteriori" calculada foi:
',num2str(sigpos),'.'))
disp(strcat('O valor de "chi" quadrado calculado foi: ',num2str(chiq),'.'))
chimin=chi2inv(0.05,glib);
chimax=chi2inv(0.95,glib);
disp(strcat('Valor mínimo de chi (5%): ',num2str(chimin),'.'))
disp(strcat('Valor máximo de chi (95%): ',num2str(chimax),'.'))
if chiq<=chimax & chiq>=chimin
    disp('O ajustamento passou pelo teste de chi quadrado (significância de
5%).')
else
    disp('O ajustamento foi reprovado pelo teste de chi quadrado (significância
de 5%).')
end
chimin2=chi2inv(0.01,glib);
chimax2=chi2inv(0.99,glib);
disp(strcat('Valor mínimo de chi (1%): ',num2str(chimin2),'.'))
disp(strcat('Valor máximo de chi (99%): ',num2str(chimax2),'.'))
if chiq<=chimax & chiq>=chimin
    disp('O ajustamento passou pelo teste de chi quadrado (significância de
1%).')
else
    disp('O ajustamento foi reprovado pelo teste de chi quadrado (significância
de 1%).')
end

mvc=sigpos*(inv(N));
save f:\disk\sigma.dat mvc -ascii -tabs
disp('A matriz variância-covariância foi salva no arquivo SIGMA.DAT.')

```

```

for fim=1:6:6*nfot-5
    final=(fim+5)/6;
    kv(final)=Xv0(fim,1);
    fv(final)=Xv0(fim+1,1);
    ov(final)=Xv0(fim+2,1);
    X0v(final)=Xv0(fim+3,1);
    Y0v(final)=Xv0(fim+4,1);
    Z0v(final)=Xv0(fim+5,1);
end

kv=kv*180/pi;
fv=fv*180/pi;
ov=ov*180/pi;

orifotos=[kv
          fv
          ov
          X0v
          Y0v
          Z0v];

for ak=nco:3:nco+3*npts-2
    an=((ak-nco)+3)/3; %apenas uma transformação para compensar os
    %parâmetros anteriores(k,f,om,etc.)
    Xpt(an)=Xv0(ak,1);
    Ypt(an)=Xv0(ak+1,1);
    Zpt(an)=Xv0(ak+2,1);
end

pontos=[Xpt
        Ypt
        Zpt];
pontos=pontos';

save f:\disk\orifotos.dat orifotos -ascii -tabs
save f:\disk\pontos.dat pontos -ascii -tabs

```

## APÊNDICE 4 – PROGRAMA PARA GERAÇÃO DE ORTOIMAGENS A PARTIR DE IMAGENS CAPTURADAS PARA UM COMPUTADOR

```
%Este programa produz uma ortofoto, tendo como dados alguns arquivos iniciais.
%O programa necessita ler um arquivo contendo as coordenadas X, Y e Z
%em metros de um Modelo Digital do Terreno (MDT) no referencial (geodésicos,
E, N e h),
%outro com os parâmetros de orientação exterior da imagem (kappa; fi; ômega;
X0; Y0; e Z0);
%o arquivo da imagem, em níveis de cinza, do tipo RAW; e um arquivo com os
parâmetros de
%calibração da câmara utilizada.
%A organização do arquivo do MDT é a dada pelo formato SURFER ASCII-GSD, onde
%tem-se apenas os limites de área (E, N), e a altimetria é espaçada de acordo
com o
%intervalo desejado, ou seja, a escala dos pixels. LEMBRE-SE DE TIRAR O
CABEÇALHO!!!!
%A organização do arquivo de coordenadas x e y (imagem digital, em pixels) é a
seguinte:
%o número do ponto (só algarismos); o número da foto (só algarismos);
%a coordenada x (pixels); e a coordenada y(pixels).
%A organização do arquivo de parâmetros é a seguinte: x0; y0; c; K1; K2; K3;
P1;
P2; A; e B. Caso algum valor não seja significativo, deixá-lo como sendo
igual a zero.

clear all
clc
format short g

%Leitura dos arquivos de dados

ondemdt=input('Entre com o caminho do arquivo de MDT (E, N, h) (sem a última
barra)\n','s');
nomemdt=input('Entre com o nome do arquivo de MDT (*.dat), SEM A
EXTENSÃO\n','s');
mdtcol=input('Entre com o número de colunas do MDT\n');
disp('Lendo arquivo. Por favor, aguarde...')
trilhamdt=strcat(ondemdt,'\ ',nomemdt, '.dat');
fid=fopen(trilhamdt,'r');
mdt=fscanf(fid,'%g',[mdtcol inf]);
mdt=mdt';
fclose(fid);
disp('Terminado')

ondepar=input('Entre com o caminho do arquivo de parâmetros da estação de
exposição (sem a última barra)\n','s');
nomepar=input('Entre com o nome do arquivo de parâmetros da estação de
exposição (*.dat), SEM A EXTENSÃO\n','s');
trilhapar=strcat(ondepar,'\ ',nomepar, '.dat');
eval(['load ' trilhapar]);

ondeparc=input('Entre com o caminho do arquivo de parâmetros de calibração
(sem a última barra)\n','s');
```

```

nomeparc=input('Entre com o nome do arquivo de parâmetros de calibração
(*.dat), SEM A EXTENSÃO\n','s');
trilha parc=strcat(ondeparc,'\ ',nomeparc,'.dat');
eval(['load ' trilha parc]);

ondeim=input('Entre com o caminho do arquivo de dados da imagem (níveis de
cinza) (sem a última barra)\n','s');
nomeim=input('Entre com o nome do arquivo de dados da imagem (*.raw), SEM A
EXTENSÃO\n','s');
trilha im=strcat(ondeim,'\ ',nomeim,'.raw');

%Parâmetros iniciais da imagem
camhor=input('Entre com a dimensão horizontal (mm) do sensor da câmera\n');
camver=input('Entre com a dimensão vertical (mm) do sensor da câmera\n');
imcol=input('Entre com o número de colunas da imagem\n');
c=eval(strcat(nomeparc,'(3,1)'));
emin=input('Entre com o valor mínimo de "E" (metros)\n');
emax=input('Entre com o valor máximo de "E" (metros)\n');
nmin=input('Entre com o valor mínimo de "N" (metros)\n');
nmax=input('Entre com o valor máximo de "N" (metros)\n');
intv=input('Entre com o espaçamento do MDT (metros)\n');

%Leitura da imagem propriamente dita
disp('Lendo imagem... por favor, espere')
fid=fopen(trilha im,'r');
I=fread(fid,[imcol,inf]);
fclose(fid);
I=I';
imlin=size(I,1);
imcol=size(I,2);
disp('Terminado.')

%Inicialização dos valores necessários
k=eval(strcat(nomeparc,'(1)'))*pi/180;
f=eval(strcat(nomeparc,'(2)'))*pi/180;
om=eval(strcat(nomeparc,'(3)'))*pi/180;
X0=eval(strcat(nomeparc,'(4)'));
Y0=eval(strcat(nomeparc,'(5)'));
Z0=eval(strcat(nomeparc,'(6)'));
X=sym('X');
Y=sym('Y');
Z=sym('Z');

%Coeficientes das equações de colinearidade
m11=cos(f)*cos(k);
m12=cos(om)*sin(k)+sin(om)*sin(f)*cos(k);
m13=sin(om)*sin(k)-cos(om)*sin(f)*cos(k);
m21=-cos(f)*sin(k);
m22=cos(om)*cos(k)-sin(om)*sin(f)*sin(k);
m23=sin(om)*cos(k)+cos(om)*sin(f)*sin(k);
m31=sin(f);
m32=-sin(om)*cos(f);
m33=cos(om)*cos(f);
x=-c*( (m11*(X-X0)+m12*(Y-Y0)+m13*(Z-Z0))/(m31*(X-X0)+m32*(Y-Y0)+m33*(Z-Z0)));
y=-c*( (m21*(X-X0)+m22*(Y-Y0)+m23*(Z-Z0))/(m31*(X-X0)+m32*(Y-Y0)+m33*(Z-Z0)));

```



```
%Foi adotado um valor médio de "K", para a refração fotogramétrica, igual a
3.05e-05
K=3.05e-5;
```

```
%Iniciando o processo de formação da imagem ortorretificada
```

```
%Iniciando a matriz que receberá a nova imagem
```

```
for a=1:size(mdt,1)
    for b=1:size(mdt,2)
        C(a,b)=0;
    end
end
```

```
%Liberando memória
```

```
cwd=pwd;
cd(tempdir);
pack
cd(cwd)
```

```
%Parâmetros de calibração
```

```
x0=eval(strcat(nomeparc,'(1,1)'));
y0=eval(strcat(nomeparc,'(2,1)'));
K1=eval(strcat(nomeparc,'(4,1)'));
K2=eval(strcat(nomeparc,'(5,1)'));
K3=eval(strcat(nomeparc,'(6,1)'));
P1=eval(strcat(nomeparc,'(7,1)'));
P2=eval(strcat(nomeparc,'(8,1)'));
A=eval(strcat(nomeparc,'(9,1)'));
B=eval(strcat(nomeparc,'(10,1)'));
```

```
disp('Calculando as coordenadas da imagem e interpolando valores')
```

```
disp(strcat('Total de linhas do MDT :',num2str(size(mdt,1)),'.'))
ii=0;
```

```
for i=nmax:-intv:nmin
```

```
    ii=ii+1;
```

```
    disp(strcat('Calculando a linha: ',num2str(ii),'.'))
```

```
    jj=0;
```

```
    for j=emin:intv:emax
```

```
        jj=jj+1;
```

```
        X=j;
```

```
        Y=i;
```

```
        Z=mdt(ii,jj);
```

```
        xp=eval(x);
```

```
        yp=eval(y);
```

```
        r=sqrt(xp^2+yp^2);
```

```
%Adição da refração fotogramétrica
```

```
xf=xp+K*xp*(1+r^2/c^2);
```

```
yf=yp+K*yp*(1+r^2/c^2);
```

```
%Adição da escala e ortogonalidade dos eixos
```

```
xf=xf+A*xp;
```

```
yf=yf+B*xp;
```

```

%Adição da distorção descentrada
xf=xf+P1*(r^2+2*xp^2)+2*P2*xp*yp;
yf=yf+2*P1*xp*yp+P2*(r^2+2*yp^2);

%Adição da distorção radial simétrica
xf=xf+xp*K1*r^2+K2*r^4+K3*r^6;
yf=yf+yp*K1*r^2+K2*r^4+K3*r^6;

%Transformação de coordenadas fotogramétricas para "fiduciais"
xf=xf+x0;
yf=yf+y0;

%Transformação de coordenadas fotogramétricas para de imagem (pixels)
lin=imlin*(0.5-yf/camver);
col=imcol*(0.5+xf/camhor);

%Verifica se as coordenadas estão dentro da imagem
if lin<=imlin
    if lin>=1
        if col<=imcol
            if col>=1
                C(ii,jj)=round(interp2(I,col,lin));
            end
        end
    end
end
end
end
end

%Mostra a ortofoto gerada
imshow(mat2gray(C))

disp(strcat('O tamanho da ortoimagem é ',num2str(size(mdt,1)),...
    ' linhas por ',num2str(size(mdt,2)), ' colunas.'))
ortoim=input('Entre com o nome do arquivo que deseja salvar\n','s');
C=C';
fid=fopen(strcat(ondeim,'\ ',ortoim,'.raw'),'w');
fwrite(fid,C);
fclose(fid);

```